

**DISEÑO DE MEZCLAS DE CARBÓN Y CARBÓN-BIOMASA PARA
PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS GASIFICABLES EN LECHO FIJO**

CRISTIAN FABIÁN CRUZ CASTILLO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, BOYACÁ,
ESCUELA DE METALÚRGICA
TUNJA
2018**

**DISEÑO DE MEZCLAS DE CARBÓN Y CARBÓN-BIOMASA PARA
PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS GASIFICABLES EN LECHO FIJO**

CRISTIAN FABIÁN CRUZ CASTILLO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
METALÚRGICO**

DIRECTOR: Ms.C. Ing. LUIS FERNANDO LOZANO GÓMEZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, BOYACÁ,
ESCUELA DE METALÚRGICA
TUNJA
2018**

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 24 mayo de 2018

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación.

Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de grado a mi madre MARÍA VICTORIA CASTILLO que es la luz de mi vida junto con mis hermanos DAVID, JULIÁN y especialmente ALEJANDRO. Este logro tan grande no hubiese sido posible sin el apoyo y la paciencia que me has tenido a través de tantos años de estudio.

A veces no puedo ser el mejor hijo del mundo, pero sabes que eres mi vida y te amo con toda mi alma, vivo por que me diste ese grandioso regalo y estoy eternamente agradecido por tener tan grandiosa persona que me guía en los momentos más difíciles y me da sus más sabios consejos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al grupo de investigación en Carbones y Carboquímica UPTC, por su colaboración en la investigación en especial a los Ing. Marco Ardila y Eduardo Gil por su apoyo y el tiempo dedicado. A mi director, Ing. Fernando Lozano, por su apoyo y guía en la elaboración de este proyecto.

Gracias a la escuela de metalurgia y sus docentes por haber contribuido en mi formación profesional en especial agradezco al ingeniero Pedro Jaimes por su apoyo y amistad.

Gracias a mi madre María Victoria Castillo y su esposo Julio Alberto Molano Suesca y mis hermanos David Fernando Cruz, Julián Andrés Cruz y Alejandra Castillo. Por haberme dado su apoyo y consejos para lograr este gran objetivo que hoy disfrutamos juntos. Y a mi padre Jaime Enrique Cruz le agradezco la vida que me dio y mis años de infancia.

A mis amigos de infancia y carrera, en especial a Jorge Cuentas, Sergio Mendoza, Daniel Pardo, Brayan Rativa y Edward Rodríguez. Se que fue un camino largo, pero lo he logrado. ¡GRACIAS Pape Pape Pape!.

Y agradezco a todas aquellas personas que no nombre ya que me es difícil mencionarlos a todos.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN.....	18-19
1.MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	19
1.1. CARBÓN.....	19
1.1.1 Reservas de carbón a nivel internacional y nacional..	20
1.1.1.2 Reservas nacionales.....	20
1.1.2 Producción de carbón. .	21
1.1.2.1 Producción mundial.....	21
1.1.2.2 Producción nacional.....	21
1.2. BIOMASA.....	22
1.2.1 Clasificación de biomasa.....	22
1.2.2 Ventajas y desventajas de su uso. .	23
1.2.3.1 Ventajas.	23
1.2.3.2 Desventajas	24
1.3. MEZCLAS CARBÓN-BIOMASA	24
1.4. BRIQUETAS	25
1.4.1 Composición de las briquetas..	26
1.4.2 Ventajas del uso de briquetas.	27
1.4.3 Ventajas ambientales de las briquetas.....	27
1.5 GASIFICACIÓN	27
1.5.1 Pasos de la gasificación del carbón.	28
1.5.2 Reacciones químicas de la gasificación.	29
1.5.3 Tipos de flujo del Gasificador.	30
2.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	32
2.1. MATERIAS PRIMAS	32
2.2. PREPARACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	32
2.2.1 Preparación biomasa.	32
2.2.2 Preparación carbón.	34

2.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS (ANÁLISIS PRÓXIMOS)	36
2.3.1 Humedad residual.	37
2.3.2 Material volátil.	39
2.3.3 Cenizas.	41
2.3.4 Carbono fijo.....	44
2.4. ANÁLISIS ÚLTIMOS	44
2.4.1 Poder calorífico.	45
2.4.2 Fusibilidad de cenizas.	45
2.4.3 Termogravimetría (TGA).	46
2.4.4 Sulfurometro (Contenido de azufre).	48
2.5. ELABORACIÓN DE MEZCLAS Y CARACTERIZACIÓN	49
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	52
3.1. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES DE LA PROVINCIA CENTRO DE BOYACÁ.....	52
3.2. CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA (<i>CHENOPODIUM ÁLBUM</i>).....	53
3.3. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CARBÓN-BIOMASA	54
3.3.1 Humedad..	54
3.3.2 Material volátil.	55
3.3.3 Cenizas.	57
3.3.4 Carbono fijo.....	59
3.3.5 Contenido de azufre.....	60
3.3.6 Índice de hinchamiento (FSI)..	62
3.3.7 Poder calorífico.	64
3.3.8 Fusibilidad de cenizas.	66
3.3.9 Termogravimetría.....	75
3.3.10 Gasificación.	79
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pag.
Fotografía 1: Briquetas	26
Fotografía 2: Cuarteo	35
Fotografía 3: Proceso de molienda	35
Fotografía 4: Tamizado	36
Fotografía 5: Estufa para determinación de humedad	38
Fotografía 6: Horno Hoskin	41
Fotografía 7: Mufla	44
Fotografía 8: Bomba Calorimétrica	45
Fotografía 9: Equipo de fusibilidad de cenizas	46
Fotografía 11: Equipo de análisis termogravimétrico (TGA)	47
Fotografía 12: Sulfurometro S-144 DR	48
Fotografía 13: Plano de la briqueta	49
Fotografía 14: Reactor lecho fijo	50
Fotografía 15: Equipo ORSAT	51
Fotografía 16: Inicio de inyección de oxígeno	66
Fotografía 17: Fusibilidad cenizas (carbón)	67
Fotografía 18: Final del proceso	67
Fotografía 19: Pirámides cenizas de carbón M1 y M2 después del proceso	68
Fotografía 20: Proceso Fusibilidad de cenizas (Biomasa)	68
Fotografía 21: Temperatura IT para biomasa	69
Fotografía 22: Temperatura ST (Biomasa)	69
Fotografía 23: Temperatura HT (Biomasa)	70
Fotografía 24: Temperatura HT (Biomasa)	70
Fotografía 25: Bases después del proceso de fusibilidad (Biomasa)	71
Fotografía 26: Proceso fusibilidad de cenizas (Mezclas)	72
Fotografía 27: Temperatura IT para mezclas	72

Fotografía 28: Temperatura ST para mezclas	73
Fotografía 29: Temperatura HT para mezclas	73
Fotografía 30: Temperatura HT para mezclas	74
Fotografía 31: Bases después del proceso de fusibilidad (Mezclas)	74

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Clasificación de los carbones por Rango	19
Tabla 2: Reservas mundiales de carbón en 2016	20
Tabla 3: Producción mundial de carbón en 2016	21
Tabla 4: Producción nacional de carbón en el 2016	21
Tabla 5: Normas ASTM preparación de muestras	32
Tabla 6: Normas ASTM caracterización de muestras	36
Tabla 7: Tabla experimentación	49
Tabla 8: Análisis próximos carbones provincia centro Boyacá.	52
Tabla 9: Rango de Carbones según ASTM D388	52
Tabla 10: Rangos de propiedades gasificables de los carbones	53
Tabla 11: Análisis próximos biomasa	53
Tabla 12: Contenido de humedad mezclas M1-Biomasa	54
Tabla 13: Contenido de humedad mezclas M2-Biomasa	54
Tabla 14: Contenido de humedad mezcla M1-M2	55
Tabla 15: Contenido de Material volátil mezcla M1-Biomasa	55
Tabla 16: Contenido de Material volátil M2-Biomasa	56
Tabla 17: Contenido de Material Volátil M1-M2	57
Tabla 18: Contenido de cenizas mezcla M1-Biomasa	57
Tabla 19: Contenido de cenizas mezcla M1-Biomasa	58
Tabla 20: Contenido de cenizas mezcla M1-M2	58
Tabla 21: Carbono fijo mezclas M1-Biomasa	59
Tabla 22: Carbono fijo mezclas M2-Biomasa	59
Tabla 23: Carbono fijo mezclas M1-M2	60
Tabla 24: Contenido de azufre M1-Biomasa	60
Tabla 25: Contenido de azufre M2-Biomasa	61
Tabla 26: Contenido de Azufre M1-M2	62

Tabla 27: Índice de hinchamiento (FSI) M1-Biomasa	62
Tabla 28:Índice de hinchamiento (FSI) M2-Biomasa	63
Tabla 29: Índice de hinchamiento (FSI) M1-M2	63
Tabla 30:Resultados del Poder calorífico	64
Tabla 31: Poder calorífico de las mezclas	65
Tabla 32: Resultados fusibilidad ceniza de Biomasa	71
Tabla 33: Resultados fusibilidad ceniza Carbón (malla 16)-Biomasa.	75
Tabla 34: Gasificación de las mezclas	79

LISTA DE GRAFICAS

	Pag.
Gráfica 1:Poder calorífico	64
Gráfica 2: Poder calorífico de las mezclas	65
Gráfica 3: TGA Carbón M2	76
Gráfica 4: TGA biomasa (Chenopodium)	77
Gráfica 5: TGA Carbón M2 75% y Biomasa (Chenopodium) 25%.....	78

LISTA DE DIAGRAMAS

	Pag.
Diagrama 1: Etapas proceso de gasificación	29
Diagrama 2: Configuración de tiro directo o updraft.....	31
Diagrama 3: Preparación de muestras (secado).....	33
Diagrama 4: Preparación de muestras (tamizado).....	34
Diagrama 5: Procedimiento humedad.....	37
Diagrama 6: Procedimiento material volátil.....	39
Diagrama 7: Procedimiento cenizas carbón	42
Diagrama 8: Procedimiento cenizas biomasa.....	43

RESUMEN

Esta investigación tiene por objeto diseñar mezclas de carbón-biomasa, para producir briquetas gasificables en reactores de lecho fijo, esto con el fin de promover usos alternativos del carbón, bajo condiciones sostenibles y de óptima eficiencia energética. Los resultados corresponden a la selección y caracterización de carbones y biomasa (*Chenopodium album*), de la provincia centro de Boyacá siguiendo procedimientos de normas ASTM. Para la fabricación de briquetas, a partir de mezclas de carbón con biomasa, a diferentes granulometrías (bajo malla 8, 16, 30), presión de 15 MPa y utilizando parafina como aglomerante en 15% del peso de la mezcla. Una vez se seleccionó la mezcla de carbón-biomasa se procedió a elaborar pruebas de gasificación en el reactor de lecho fijo y se determinaron las propiedades gasificables de la mezcla seleccionada.

Palabras clave: Carbón, Biomasa, Flora Arvense, Briquetas, Co-gasificación, Mezclas Carbón-Biomasa, Tecnologías limpias.

ABSTRACT

This research aims to design mixtures of carbon biomass to produce gasifiable briquettes in fixed-bed reactors. This in order to promote alternative uses of coal in sustainable conditions and optimal energy efficiency. The results correspond to the selection and characterization of coals and biomass (*Chenopodium album*), of the central province of Boyacá following procedures of ASTM standards. The manufacture of briquettes was carried out from coal mixtures with biomass, at different granulometries (under mesh 8, 16, 30), pressure of 15 MPa and using paraffin as binding agent in 15% of the weight of the mixture. Once the coal-biomass mixture was selected, gasification tests were implemented in the fixed-bed reactor, and the gasifiable properties of the selected mixture were determined.

Keywords: Coal, Biomass, Arvense Flora, Briquettes, Co-gasification, Carbon-Biomass Mixtures, Clean technologies

INTRODUCCIÓN

Colombia es el primer productor de carbón de América Latina y el octavo en el mundo. Se estima que Colombia tiene una reserva equivalente a 4.881 millones de toneladas al terminar el año 2016¹.

El carbón térmico que se produce en el interior del país abastece el mercado nacional, su consumo incremento en 78,81% entre 2005 y 2011, y tuvo una disminución sostenida a partir del año 2011².

Los combustibles fósiles durante la combustión generan emisiones significativas de NO_x, SO_x y CO₂, los cuales producen lluvias ácidas, agotamiento de la capa de ozono, calentamiento global, entre otros³; por tanto, se requiere encontrar recursos renovables para reducir las emisiones gaseosas de estos combustibles⁴. Estudios recientes muestran que la combustión de biomasa con combustibles fósiles, en generación de potencia, tiene un impacto positivo a nivel ambiental y económico⁵. Las mezclas carbón-biomasa son una buena opción, ya que existe una gran variedad de biomazas vegetales, aptas para el proceso de co-gasificación del carbón⁶.

En la producción agrícola existe una gran variedad de flora arvense o maleza, que compite por la luz, el aire y los nutrientes del suelo⁷, afectando la eficiencia de la cosecha; esta flora se erradica manualmente o mediante el uso herbicidas químicos, lo cual produce contaminación ambiental, eleva los costos de producción y genera potenciales riesgos para la salud por presencia de residuos tóxicos.

¹ BP Statistical Review of World Energy. 66th edition, June. 2017. P. 36 y 37.

² UPME, Unidad de Planeación Minero-Energética. La cadena del carbón. Bogotá: Hecho en Colombia. 2012. Retrieved from http://www.simco.gov.co/Portals/0/publicaciones/carbon_v2.pdf.

³ DEMIRBAŞ, A. Sustainable cofiring of biomass with coal. In Energy Conversion and Management. 2003 (pp. 1465-1479). [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00144-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00144-9).

⁴ EMAMI-TABA, L; IRFAN, M.F.; WAN DAUD, W.M.A; CHAKRABARTI, M.H. Fuel blending effects on the co-gasification of coal and biomass . A review. Biomass and Bioenergy, 2013. 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.043>.

⁵ BRUCE A y Tillman, D. Wood cofiring evaluation at tva power plants.1996

⁶ RIZKIANA, G. G. Effect of biomass type on the performance of cogasification of low rank coal with biomass at relatively low temperatures. *Matsubara, Aomori Japan: Elsevier*, 2014. P. 134

⁷ PINILLA, C. Identificación de la flora asociada a plantaciones de banano en Urabá y Magdalena. XXIII Congreso Anual Manejo Integrado de Arvenses, Santa Marta. 2002. P. 129-151.

El desarrollo de la presente investigación se basó en diseñar mezclas de carbón y carbón-biomasa para la producción de briquetas gasificables en reactores de lecho fijo. Para cumplir con este propósito se establecen objetivos puntuales que ayudaron a alcanzar la finalización de este proyecto.

Con lo cual lo primero que se hizo fue seleccionar los carbones de bajo rango de la provincia centro de Boyacá, que mejores propiedades gasificables presentaran y favorecieran así el proceso de gasificación.

Seguido a esto, se determinaron las propiedades gasificables de la biomasa vegetal clasificada como maleza (*Chenopodium*) en cultivos agrícolas transitorios, con el fin de ver si favorece la gasificación.

Lo que conllevó a preparar mezclas binarias de carbón y carbón-biomasa en distintas proporciones, presiones y granulometrías. Para elaborar briquetas con especificaciones adecuadas para la gasificación

Por último, se evaluaron las propiedades gasificables de las mezclas de carbón-biomasa en briquetas mediante pruebas de gasificación en reactor de lecho fijo y con eso se dio por terminada la investigación.

La necesidad de buscar energías alternativas, en un mundo que cada vez tiene más conciencia del impacto ambiental al que está sometido. Hace prioritario buscar tecnologías limpias que sean competitivas y sostenibles, en cuestiones energéticas y económicas en contraste con las fuentes de energías tradicionales.

La gasificación es un proceso en el cual, en lugar de quemar el carbón éste se transforma químicamente en gas de síntesis. Esta tecnología no es nueva ya que se había usado hace décadas, pero el bajo costo del gas natural la había relegado. Debido al alto costo del gas natural actualmente, esta surge como una buena alternativa no contaminante y más amigable con el medio ambiente.

1. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abarcará lo correspondiente a las investigaciones realizadas y la teoría.

1.1. CARBÓN

El carbón es una roca sedimentaria combustible compuesta esencialmente de carbono, de hidrógeno y de oxígeno. Se forma en cuencas límnicas (intercontinentales) y parálicas (incursiones marinas). Su composición es heterogénea constando principalmente de materia orgánica; contiene constituyentes minerales de las plantas a partir de las cuales se formó, e inclusiones de otras materias orgánicas encerradas durante su formación geológica⁸.

La norma ASTM D-388 clasifica los carbones por rango⁹, este se define en la norma ASTM D-121, como el grado de metamorfismo, o alteración progresiva del mineral, desde el lignito hasta la antracita¹⁰. Las características se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de los carbones por Rango

CLASE	GRUPO	CARBONO FIJO %		MATERIA VOLÁTIL %		PODER CALORIFICO Cal / g.		CARÁCTER AGLOMERANTE
		≥	<	≥	<	≥	<	
I. ANTRACITA	1. Meta – Antracita	98	--	--	2	--	--	AGLOMERANTE
	2. Antracita	92	98	2	8			
	3. Semi – Antracita	86	92	8	14			
II. BITUMINOSO	1. Bituminoso Bajo Volátil	78	86	14	22			COMUNMENTE AGLOMERANTE
	2. Bituminoso Medio Volátil	69	78	22	31			
	3. Bituminoso Alto Volátil A		69	31		7780	7780	
	4. Bituminoso Alto Volátil B					7220	7220	
	5. Bituminoso Alto Volátil					6380	6380	AGLOMERANTE
III. SUB-BITUMINOSO						5830	6380	NO AGLOMERANTE
						5830	5830	
						5280	5280	
IV. LIGNITO						4610	4610	NO AGLOMERANTE
						3500	3500	

Fuente: Norma A.S.T.M. D 388.

⁸ Lexique International de Petrografia des Charbon. Segunda Edición. Paris, 1963.

⁹ ASTM D 388. Standard Classification of Coals by Rank. En: Annual Book of ASTM Standards. United States, 2012. P. 2

¹⁰ ASTM D 121. Standard Terminology of Coal and Coke. En: Annual Book of ASTM Standards. United States, 2002. P. 10

1.1.1 Reservas de carbón a nivel internacional y nacional. La reserva es una estimación basada sólo en los niveles de producción y los niveles de reservas demostradas para los países indicados.

1.1.1.1. Reservas mundiales. Se estima que las reservas probadas de carbón del mundo que terminarán 2016 en 1'139.331 MT (millones de toneladas). Las principales reservas se encuentran en la tabla 2:

Tabla 2: Reservas mundiales de carbón en 2016

PAIS	Reservas en MT	Porcentaje
Estados unidos	251.582	22,1
China	244.010	21,4
Rusia	160.364	14,1
Australia	144.818	12,7
India	94.769	8,3
Alemania	36.212	3,2
Ucrania	34.375	3,0
Kazajstán	25.605	2,2
Indonesia	25.573	2,2
Polonia	24.161	2,1
Turquía	11.353	1,0
Sudáfrica	9.893	0,9
Colombia	4.881	0,4
Resto del mundo	71.735	6,4
Total	1'139.331	100

Fuente: BP Statistical Review of World Energy.

Las reservas mundiales de carbón demostradas son actualmente suficientes para satisfacer 153 años de producción mundial, aproximadamente tres veces más que las de petróleo y gas.¹¹

1.1.1.2 Reservas nacionales. Colombia tiene el (0,4%) de la reserva mundial de carbón, equivalente a 4.881 millones de toneladas al terminar el año 2016, este en su mayor parte de tipo antracítico y bituminoso usados en la generación de energía eléctrica y en la industria siderúrgica para la producción de coque¹⁰.

¹¹ BP Statistical Review of World Energy. 66th edition, June. 2017. P. 36 y 37.

1.1.2 Producción de carbón. Está basada en la producción y exportación de carbón de cada uno de los países.

1.1.2.1 Producción mundial. La producción mundial de carbón alcanzó 3.656,4 MT (millones de toneladas) en 2016¹⁰, los principales países productores del año se muestran en la tabla 3:

Tabla 3: Producción mundial de carbón en 2016

País	Producción en MT	Porcentaje
China	1685,7	46,1
Estados unidos	364,8	10
Australia	299,3	8,2
India	288,5	7,9
Indonesia	255,7	7,0
Rusia	192,8	5,3
Sudáfrica	142,4	3,9
Colombia	62,5	1,7
Polonia	52,3	1,4
Kazajstán	44,1	1,2
Alemania	39,9	1,1
Canadá	31,4	0,9
Resto del mundo	197	5,3
Total	3656.4	100

Fuente: BP Statistical Review of World Energy.

1.1.2.2 Producción nacional. La producción nacional de carbón alcanzó 43'936.400,62 toneladas entre el primer y segundo trimestre del 2017¹², los principales departamentos productores se muestran en la tabla 4:

Tabla 4: Producción nacional de carbón en el 2016

Departamento	Producción en miles toneladas
Cesar	48.283
La guajira	32.683
Cundinamarca	2.453

¹² Agencia nacional de minería. Producción de carbón por departamento. Minería. P.2.

Boyacá	3.129
Norte de Santander	2.152
Córdoba	1.374
Santander	165
Antioquia	145
Cauca	65
Valle del cauca	62
Casanare	2
Total	88.361

Fuente: Agencia nacional de minería

1.2. BIOMASA

La biomasa es el conjunto de la materia orgánica, de origen animal y vegetal, que puede ser utilizada con fines energéticos. Esta es una fuente de energía renovable. De hecho, es la fuente de energía renovable que más aporta en la actualidad a las necesidades de la humanidad. La energía de la biomasa proviene del Sol a través del proceso de la fotosíntesis. Éste es el proceso por el cual las células vegetales son capaces de formar sustancias orgánicas a partir del CO₂ presente en el aire y de otras sustancias simples. De las sustancias formadas, que llamamos carbohidratos, se puede extraer energía quemándolas directamente, o bien convirtiéndolas en un líquido combustible como el alcohol o el aceite, o en nuestro caso transformándolas en gas.¹³

1.2.1 Clasificación de biomasa. Según el doctor Xavier Castells la biomasa, como recurso energético, puede clasificarse en biomasa natural, residual y los cultivos energéticos.¹⁴

La biomasa natural: se produce por ecosistemas naturales, como por ejemplo los bosques.

La biomasa residual: es el subproducto o derivado de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, así como residuos de la industria agroalimentaria (alpechines, bagazos, cáscaras, vinazas, etc.) y en la industria de transformación

¹³ FERNÁNDEZ, Jesús. Energías Renovables para todos “Biomasa”. Energías Renovables. 2011. P.2.

¹⁴ CASTELLS, Xavier. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos: Biomasa, Barcelona, España. 2005. P.118. ISBN: 84-7978-694-9.

de la madera (aserraderos, fábricas de papel, muebles, etc.), y residuos de depuradoras y el reciclado de aceites.

Los cultivos energéticos: constituidos por aquellos vegetales que están destinados exclusivamente, a su aprovechamiento energético. Como la producción de biocombustibles.

1.2.2 Ventajas y desventajas de su uso. Primero se abarcará sobre las ventajas y a continuación las desventajas del uso de la biomasa.

1.2.3.1 Ventajas.¹⁵

- Es una fuente de energía renovable: En todo el planeta existe la posibilidad de acceder a fuentes de biomasa tales como restos de cosecha, estiércol y basura orgánica. El ritmo de transformación se asemeja al ritmo de crecimiento de cosechas y recolección, y puede ser tan corta como unos meses en algunos casos.
- Neutral respecto a las emisiones de carbono: Esta tal vez sea la mayor y más importante ventaja de la energía procedente de la biomasa. La biomasa entra de lleno en el ciclo del carbono. El carbono de la atmósfera es captado por las plantas durante la fotosíntesis y pasa a formar parte de sus estructuras. Cuando la planta muere o es quemada, ese carbono retorna a la atmósfera. Puesto que es un ciclo, los siguientes cultivos absorben el carbono una y otra vez, por lo que se mantiene un equilibrio entre la cantidad de carbono que el combustible de la biomasa libera a la atmósfera y la cantidad que las plantas extraen de ella. Por este motivo, los combustibles procedentes de la biomasa no contribuyen al calentamiento global, y tienen la consideración de combustibles limpios.
- Mínimo precio: El aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa resulta muy económico comparado con el petróleo o el carbón. Suele costar alrededor de un tercio de los combustibles fósiles para obtener el mismo resultado.
- La biomasa es abundante: La biomasa está disponible en grandes cantidades por todo el mundo. Por lo tanto, en general no son necesarias grandes infraestructuras de transporte para llevarlas a su punto de destino.

¹⁵ ENERGIAS RENOVABLES. Biomasa: ventajas y desventajas [en línea]. <<http://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/biomasa-ventajas-desventajas/>>[citado en 22 septiembre de 2017]

1.2.3.2 Desventajas

- Requiere espacio: Se necesitan grandes áreas para los diferentes procesos destinados a la obtención de energía de la biomasa. También las zonas de almacenamiento pueden ser particularmente extensas.
- Aspectos medioambientales: En ocasiones se destinan a la obtención de biomasa amplias zonas forestales o silvícolas, destruyendo hábitats de gran valor ecológico y provocando la desaparición o el movimiento de especies animales al destruir sus refugios y fuentes de alimento.

1.3. MEZCLAS CARBÓN-BIOMASA

A nivel mundial se han realizado investigaciones correspondientes a las mezclas de carbón y biomasa para gasificación a continuación se mostrarán:

Efecto del tipo de biomasa en el rendimiento de co-gasificación de carbón de bajo rango con biomasa a temperaturas relativamente bajas. En esta investigación se usaron tres tipos de biomasa: Cedro Japonés, cascarilla de arroz y algas. Y estos fueron sometidos a temperaturas bajas en un reactor de lecho fijo de corriente descendente. Se determinó que la mezcla de carbón con biomasa reveló un efecto de sinergia promoviendo la tasa de gasificación, y varía dependiendo del tipo de biomasa, siendo las algas las que promovieron la gasificación de manera significativa. Los resultados también permitieron indicar que la co-gasificación de carbón con biomasa es factible a temperaturas bajas.¹⁶

Efecto en el rendimiento de la combustión de la relación de mezclas de biomasa y carbones de diferentes rangos. En esta investigación se estudiaron las características de combustión de mezclas de biomasa y carbones de diferentes rangos. En este proceso se pudo observar que al quemarse a una temperatura inferior hay un aumento de partículas y una rápida emisión de materia volátil, además se pudo determinar que la adición de biomasa al carbón no tuvo un impacto evidente en el rendimiento de la combustión. Para este estudio se usaron tres muestras de carbón bituminoso de bajo rango de Indonesia, uno de alto rango de Australia y la biomasa pellets de madera de Canadá cada mezcla se procesó y se tamizó al tamaño deseado y después se mezcló en diferentes proporciones para luego llevarlos al quemador de hendidura. Como resultados se pudo determinar que una adición de biomasa de 10% mejoró la combustión del carbón de bajo rango.

¹⁶ RIZKIANA, Jenny. Effect of biomass type on the performance of cogasification of low rank coal with biomass at relatively low temperatures. En: Ingeniería y arquitectura. (2014). P.2. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 42.

Además, la intensidad de quimioluminiscencia de la mezcla con el carbón de bajo rango y la biomasa aumento y la distribución en la región volátil fue mayor que la del carbón.¹⁷

Gasificación catalítica de carbón de leña, carbón y biomasa por co-pirólisis. En esta investigación se estudió la gasificación catalítica del carbón de leña de co-pirólisis del carbón y cascarilla de trigo, junto con sales alcalinas, especialmente sales de potasio, las cuales se consideran catalizadores eficaces y baratos, presentes en la biomasa. Se investigó también la influencia del álcali en el carbón y la temperatura de pirólisis en relación con su reactividad. Los resultados experimentales muestran que la co-pirólisis a 750 °C presenta una mayor reactividad y concentración de álcali. En los resultados se puede observar que no hay efectos sinérgicos durante el proceso de pirólisis, además, se observó que la reactividad de gasificación aumentó con el uso de mayor proporción de cascarilla de trigo la mezcla con carbón.¹⁸

1.4. BRIQUETAS

Las briquetas son un producto 100 % ecológico y renovable, catalogado como biomasa sólida (biocombustible), que viene en forma de cilindros, semiesferas o ladrillos compactos. Su modo de empleo es similar al de la leña tradicional, por lo que pueden utilizarse en cualquier sitio donde se utilice leña, como por ejemplo en estufas, chimeneas, salamandras, hornos, calderas y actividades industriales.¹⁹

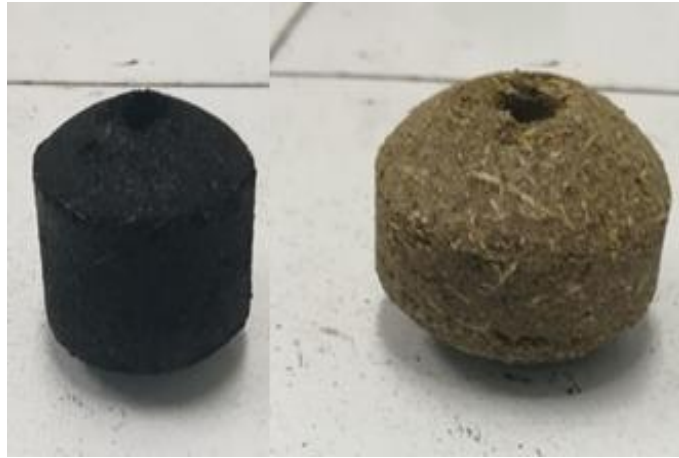
Su constitución compacta y uniforme hace que sean fáciles de transportar y limpias en su manipulación, utilizando un mínimo espacio para su almacenamiento. Además, pueden seccionarse fácilmente sin necesidad de herramientas, para poder ser utilizada en chimeneas de menor tamaño o controlar la potencia de la combustión.

¹⁷ YONMO, SUNG. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. Elsevier. Experimental Thermal and Fluid Science. (2013). Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 41.

¹⁸ WENKUI ZHUA Catalytic gasification of char from co-pyrolisis of coal and biomass. Vol. Fuel processing technology (2008). P. 89. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 43.

¹⁹ LEÑAS OLIVER. ¿Que son las briquetas? [en línea]. <<http://tiendabiomasa.com/briqueta>> [citado 28 septiembre de 2017]

Fotografía 1:Briquetas



Fuente: Autor

Protegidas ante el contacto directo del agua, las briquetas pueden ser almacenadas durante largos periodos de tiempo, sin que por ello pierdan en consistencia o calidad.

1.4.1 Composición de las briquetas. Existen muchos tipos de briquetas, ya que puede estar fabricadas con diversos materiales compactados. La materia prima de la briqueta puede ser biomasa natural (procedente de aserraderos), biomasa residual (procedente de la industria agrícola), carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas.

Las briquetas más utilizadas y de mejor calidad son las elaboradas con biomasa natural, es decir con serrín natural compactado, las cuales no utilizan ningún tipo de aglomerante ya que la humedad y la propia lignina de la madera funcionan como pegamento natural.

Están hechas de restos forestales tales como el aserrín, viruta, chips, ramas, restos de poda, etc. Los mismos son molidos, secados con un bajo porcentaje de humedad y luego compactados para formar briquetas generalmente de forma cilíndrica. Esta leña de aserrín compactado posee mayor poder calorífico que la leña tradicional, además enciende más rápido y no desprende humos ni olores.

1.4.2 Ventajas del uso de briquetas.

- Mayor poder calorífico que la leña
- Fácil y rápido encendido
- Baja humedad
- Alta densidad
- Ocupa menos espacio
- Limpias
- Homogéneas
- Fácil manipulación
- Sin olores, humos ni chispas
- Sin aglutinantes ni aditivos
- Menor porcentaje de ceniza

1.4.3 Ventajas ambientales de las briquetas

- Energía limpia no contaminante
- 100 % ecológicas y naturales
- Fuente renovable
- Fabricados con restos forestales contribuye a la limpieza del medio ambiente
- 100% reciclado
- Natural, no tóxico
- Sin conservantes, químicos ni aditivos
- Producen poco humo
- Sin malos olores
- Menos ceniza
- CO₂ neutro, lo que evita el efecto invernadero, cambio de clima y calentamiento global
- No genera impacto ambiental
- Ayuda a preservar el ambiente

1.5 GASIFICACIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual se convierten materiales carbonáceos, tales como carbón, biomásas y plásticos, para obtener un combustible o gas sintético (syngas) a partir de la oxidación parcial a elevadas temperaturas²⁰.

²⁰KIRUBAKARAN. A review on gasification of biomass. En: R. renewable and Sustainable Energy Reviews. (2009). P. 86-179.

El gas resultante contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), alquitrán, agua y pequeñas cantidades de hidrocarburos tales como el etano. Este gas posee un bajo poder calórico, del orden de 4 a 7 MJ/m³; en cambio, si se emplea como agente oxidante el O₂ se pueden alcanzar de 10 a 18 MJ/m³. La tecnología más empleada es, sin embargo, la que utiliza aire como agente oxidante, por razones económicas y tecnológicas.²¹

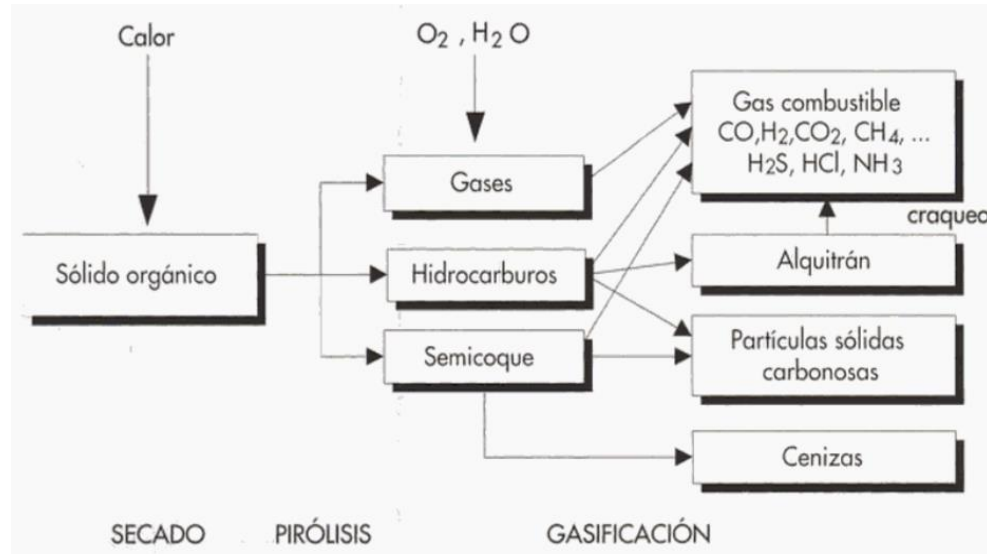
1.5.1 Pasos de la gasificación del carbón. El proceso de gasificación conlleva las siguientes etapas¹⁹:

- Secado del combustible, se lleva a cabo a temperaturas promedio de 105 °C
- Pirólisis. Se lleva a cabo dentro de un rango de temperaturas entre 300 y 400 °C; se libera la materia volátil y se obtiene un producto sólido con propiedades de semicoque o char. Dependiendo de las propiedades del combustible y del gasificador, los volátiles liberados pueden contener H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄, C₂H₆, H₂S, NH₃, olefinas, aromáticos, alquitrán y algunas cantidades de hollín. Las partículas de char contienen compuestos orgánicos (de carbono), e inorgánicos (cenizas).
- Oxidación. La inyección de oxígeno en defecto al gasificador, produce reacciones de oxidación, por lo tanto, la energía térmica requerida para las reacciones de gasificación es suministrada por la oxidación de los productos obtenidos durante la pirólisis. Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la combustión de los productos pirolizados.
- Gasificación. Cuando la temperatura de las partículas remanentes (char y hollín) sobrepasan el rango de temperatura de los 600 a 700 °C, se pueden gasificar con vapor de agua y CO₂. A presiones altas, también se pueden gasificar con H₂. Las reacciones heterogéneas de gasificación son mucho más lentas que las reacciones de pirólisis y oxidación, de esta manera controlan la velocidad; por lo tanto, el diseño y construcción de los gasificadores depende en primer lugar de estas reacciones. Además, se debe tener en cuenta que también pueden tener lugar algunas reacciones homogéneas de gasificación.

²¹ BARRAGÁN. PLAN DE NEGOCIOS, ECO COMBUSTIBLES S.A.S. ESCO S.A.S. Gestión de Tecnología. (2011). P. 26, 33, 52-58.

El diagrama 1 ilustra las etapas del proceso de gasificación así como los componentes químicos generados.

Diagrama 1: Etapas proceso de gasificación



Fuente: Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. P 420.

1.5.2 Reacciones químicas de la gasificación. La gasificación presenta reacciones químicas homogéneas y heterogéneas, producidas entre el carbón con O_2 , CO_2 y H_2O , o sus mezclas (O_2 con CO , H_2 y CO con H_2O). Los componentes deseados en el gas de síntesis son H_2 , CO y CH_4 .²²

1.5.2.1 Reacciones heterogéneas

- Reacción Boudouard: $C + CO_2 = 2CO$ ($\Delta H = +172$ kJ/mol) (1)
- Reacción Agua-Gas: $C + H_2O = CO + H_2$ ($\Delta H = +131$ kJ/mol) (2)
- Formación de metano: $C + 2H_2 = CH_4$ ($\Delta H = -74$ kJ/mol) (3)

Las reacciones de gasificación heterogéneas (sólido-gas) (Ec. 1-1;1-3) son más lentas y limitan la velocidad del proceso de gasificación.

²² CASTELLS, Xavier. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos: La Gasificación, Barcelona, España. 2005. P.418. ISBN: 84-7978-694-9

1.5.2.2 Reacciones homogéneas

- Desplazamiento Agua-Gas: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ($\Delta H = -41 \text{ kJ/mol}$) (4)
- Reformado de vapor: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ ($\Delta H = -205 \text{ kJ/mol}$) (5)

Las reacciones homogéneas (Ec 1-4 y 1-5) de gasificación con vapor de agua de 3 a 5 veces más rápida que la gasificación con dióxido de carbono.

1.5.3 Tipos de flujo del Gasificador. Existen gasificadores de distintos tipos pero todos con la misma finalidad.²³

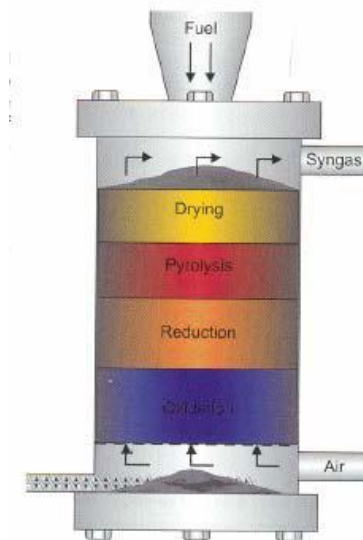
- Gasificadores de flujo entrante: el carbón pulverizado y los gases fluyen en paralelo a grandes velocidades. Este tipo es el más usado para la gasificación del carbón
- Gasificadores de lecho fluidizado: las partículas de carbón son suspendidas en el flujo de gas, el carbón alimentado es mezclado con los gases produciéndose la gasificación.
- Gasificadores de lecho movable (lecho mezclado): los gases fluyen relativamente lento a través del lecho de carbón de alimento.
- Gasificador de tiro directo (*updraft*): En el interior de este gasificador, sólido y gas se desplazan en sentido contrario. La configuración más común corresponde al sólido moviéndose en sentido descendente y el gas en ascendente. Desde el momento de su entrada al gasificador, las partículas sólidas interaccionan con la corriente gaseosa, que se encuentra a altas temperaturas. Progresivamente absorben el calor del gas, iniciándose así el proceso de secado. Llegado cierto punto, se produce la pirolisis que generará los gases que ascenderán hasta la salida del reactor. Juntamente con el gas, también se generarán en este punto alquitranes y vapores condensables que saldrán del gasificador sin ser quemados.

Continuando con su trayectoria descendente, la mezcla (o *char*) en la que se han convertido las partículas, se topará con los gases de combustión y el oxígeno necesarios para mantener térmicamente el proceso de gasificación. Es también en este momento cuando se producirán las reacciones de reducción-oxidación entre el

²³ TOLEDO. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica, mediante gasificación de biomasa. En: Ingeniería y arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). (2015). P. 25-28. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 26.

sólido y la mezcla gaseosa. El gas producido en esta zona se mezclará con el que se ha generado en la zona superior de pirolisis, formando el gas de síntesis final que se conducirá al exterior del gasificador. Cabe destacar que el perfil de temperaturas que encontramos en este tipo de gasificador es descendente, encontrándose la máxima temperatura en la base del reactor. Esto provoca directamente que a medida que la materia desciende por el gasificador, a porción de materia sólida que experimenta la conversión en gas aumenta, hasta el punto de alcanzar prácticamente el 100% en el extremo inferior. El recorrido descrito se aprecia en el diagrama 2. La construcción y operación de un gasificador de estas características es sencilla. Se logra una elevada eficiencia térmica. Aun así, la temperatura del gas de salida es baja, permitiendo realizar, en la mayoría de los casos, una combustión directa del gas de salida sin contar con estadios de refrigeración. En los aspectos menos favorables, el gas que se obtiene de este proceso requiere de uno o varios estadios de limpieza, ya que contendrá alquitranes y condensables que dañarían seriamente el motor. Otro de los peligros que entraña es que se produzca una fusión de las cenizas producidas en la gasificación. Por lo general se utiliza para aplicaciones de baja potencia.²⁴

Diagrama 2: Configuración de tiro directo o updraft



Fuente: (INERCO División de ingeniería)

²⁴ TOLEDO. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica, mediante gasificación de biomasa. En: Ingeniería y arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). (2015). P. 25-28. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 26

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIAS PRIMAS

Los carbones y biomاسas seleccionados en esta investigación son de minas y campos de la provincia centro de Boyacá.

Estos materiales requieren una caracterización, con el fin de determinar cuantitativamente el contenido de carbono fijo. Para la determinación de éste, fue necesario establecer cuantitativamente los contenidos de humedad, material volátil y cenizas de los materiales precursores²⁵

2.2. PREPARACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

A continuación, en la tabla 5 se presentarán los procedimientos normalizados para caracterización de carbón y biomasa que fueron aplicados en la investigación:

Tabla 5: Normas ASTM preparación de muestras

Prueba para:	Norma ASTM	
	Carbón	Biomasa
Muestreo	D 2234	
Preparación de muestras para análisis	D 2013 y D 3302	D- E1757 – 01

Fuente: autor

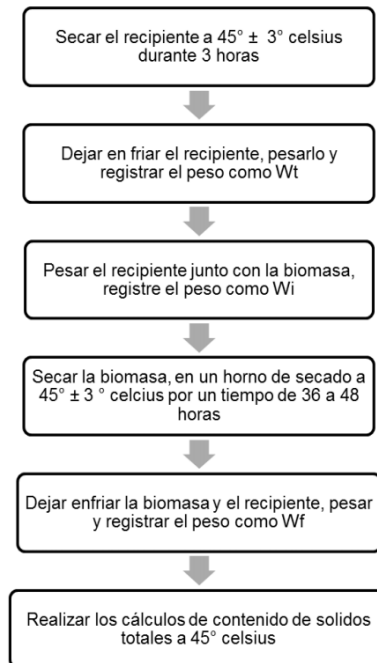
2.2.1 Preparación biomasa. La preparación de las muestras debe proporcionar una parte representativa de la muestra, cuando son recolectadas, debido a que estos materiales absorben fácilmente la humedad. Para asegurar una muestra distintiva se realiza un cuarteo, del total del material que se va a utilizar.

La metodología de preparación de muestras de biomasa para el análisis composicional está dada por la norma estandarizada ASTM E1757-01, que busca convertir la biomasa, en un material más uniforme en cuanto al tamaño y de esta manera poder realizar un análisis composicional adecuado.

²⁵ PARRA, William Alexander. Biosorción de metales pesados en drenajes mineros empleando biochar. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Tunja: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia. Facultad De Ingeniería. Escuela De Ingeniería Ambiental. 2018. 40p.

Al tratarse de materiales, altamente húmedos, se hace necesario secar la muestra a 45 grados Celsius, de la ASTM E1757-01 y que se resume en el Diagrama 3.²⁶

Diagrama 3: Preparación de muestras (secado)



Fuente: Adaptado de ASTM E1757-01)

El cálculo de contenido de sólidos totales que se secaron a 45° Celsius, se calculó según la ecuación 6.

$$\%T_{45} = \frac{W_f - W_t}{W_i - W_t} * 100 \quad (6)$$

Dónde:

%T45 = % de sólidos totales en la muestra, secos a 45° Celsius

Wt = Peso en gramos del recipiente

Wi = Peso inicial, en gramos, de la biomasa y el recipiente

Wf = Peso final de, en gramos, la biomasa y el recipiente

²⁶ PARRA, William Alexander. Biosorción de metales pesados en drenajes mineros empleando biochar. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Tunja: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia. Facultad De Ingeniería. Escuela De Ingeniería Ambiental. 2018. 41-42p.

Posterior al secado de las muestras se procede a molerlas y tamizarlas, de la norma ASTM E-1757-01, y finalmente calcular las fracciones -20/+80 y las fracciones -80, de cada material precursor, proceso detallado en el diagrama 4. Para el cálculo de las fracciones se realizarán con las ecuaciones 7 y 8 respectivamente.²⁷

$$\text{Fracción } 20/80 \% = \frac{W_{t20/80}}{W_{t20/80} + W_{t80}} * 100 \quad (7)$$

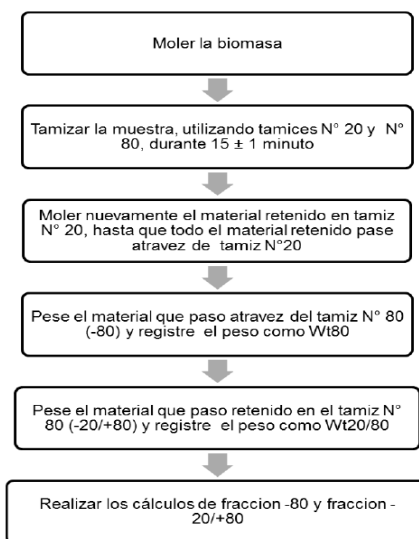
$$\text{Fracción } 80\% = 100\% - \text{Fracción } 20/80\% \quad (8)$$

Dónde:

$W_{t20/80}$ = Peso, en gramos, de la fracción 20/80

W_{t80} = Peso, en gramos, de la fracción 80

Diagrama 4: Preparación de muestras (tamizado)



Fuente: Adaptado de ASTM E1757-01

2.2.2 Preparación carbón. La muestra de carbón previamente fue triturada, sin embargo, para llevar está a una granulometría adecuada hay que seguir los siguientes lineamientos establecidos en la norma ASTM D 2013.

²⁷ ASTM E-1757-01. Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis. En: Annual Book of ASTM Standards. United States, 2015.

Fotografía 2: Cuarteo



Fuente: Autor

Seguido a esto la muestra es llevada al molino automático por el cual se pasa hasta que la muestra alcanza la granulometría requerida bajo malla 8, 16, 30.:

Fotografía 3: Proceso de molienda



Fuente: Autor

Fotografía 4: Tamizado



Fuente: Autor

2.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS (ANÁLISIS PRÓXIMOS)

Para la caracterización inicial de las materias primas se siguieron las normas ASTM establecidas mostradas en la tabla 6:

Tabla 6: Normas ASTM caracterización de muestras

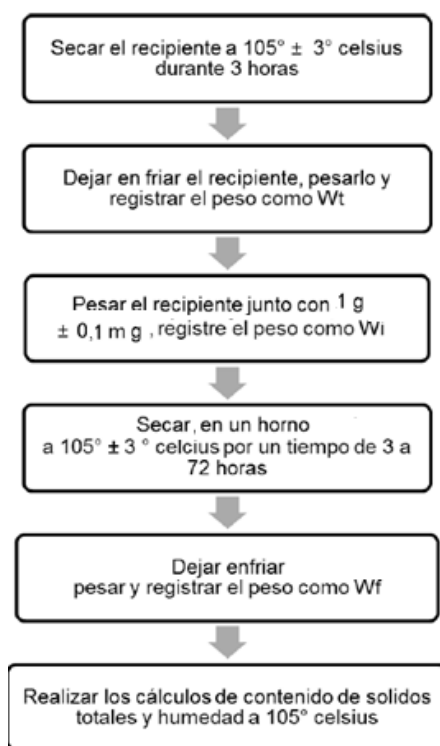
Prueba para determinación de:	Norma ASTM	
	Carbón	Biomasa
Humedad	D 3173	E1756
Materia Volátil	D 3175	E 872-82
Cenizas	D 3174	E1755
Carbono fijo	D 3172	D 3172

Fuente: autor

2.3.1 Humedad residual. En la muestra de análisis de carbón y biomasa se determina con el mismo procedimiento, estableciendo a pérdida en peso de la muestra cuando se calienta bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo, atmósfera.²⁸

El diagrama 5 muestra el procedimiento para la determinación de humedad contenida en carbones y biomásas.

Diagrama 5: Procedimiento humedad



Fuente: (Adaptado por Parra William Alexander de ASTM E1757-01)

Los resultados obtenidos fueron calculados según la norma E1756-08 Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass y las ecuaciones 9 y 10.

$$\%T105 = \frac{Wf - Wt}{Wi - Wt} * 100 \quad (9)$$

$$\%B105 = 100 - \%T105 \quad (10)$$

²⁸ INGEOMINAS. Método para la determinación de carbón y coque. Bogotá. 1988.

Dónde:

%T105 = % de sólidos totales en la muestra, secos a 105° Celsius

%B105 = % de humedad en la muestra, a 105° Celsius

Wt = Peso en gramos del recipiente con tapa

Wi = Peso inicial, en gramos, de la biomasa y el recipiente con tapa

Wf = Peso final de, en gramos, la biomasa y el recipiente

Para determinarla debe utilizarse un horno que tenga una capacidad de regulación de temperatura de $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, en nuestro caso se usó una estufa marca MEMMERT modelo UN30 ilustrada en la fotografía 5.

Fotografía 5: Estufa para determinación de humedad



Fuente: Autor

Entre tanto la ecuación 11 para la determinación de la humedad residual del carbón está dada en ASTM D 3173 Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke.

$$\text{HR}\% = \frac{(A-B)}{A} * 100 \quad (11)$$

HR = Humedad residual, porcentaje en peso.

A = Gramos de la muestra usada.

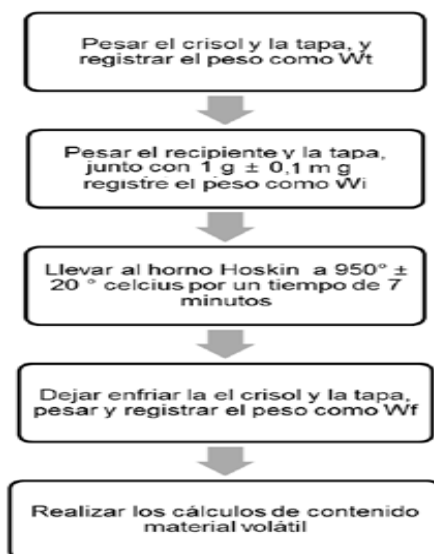
B = Gramos de la muestra después del calentamiento.

2.3.2 Material volátil. Este método determina el porcentaje de productos gaseosos excluyendo la humedad, los cuales son liberados por la muestra de análisis en las condiciones específicas del ensayo.

La materia volátil se determina estableciendo la pérdida en peso al calentar la muestra, bajo condiciones rígidamente controladas. La pérdida en peso que se obtiene corregida para la humedad residual representa el contenido de materia volátil.²⁶

El diagrama 6 nos ilustra el procedimiento usado para la determinación de material volátil del carbón y la biomasa.

Diagrama 6: Procedimiento material volátil



Fuente: (Adaptado por Parra William Alexander de ASTM E1757-01)

Los resultados obtenidos fueron calculados según la norma ASTM E872-82 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels y las ecuaciones 12 y 13.

$$A = \frac{W_f - W_t}{W_i - W_t} * 100(12)$$

$$MV = A - B\%105 \quad (13)$$

Dónde:

A = % de Pérdida de peso

%B105 = % de humedad en la muestra (valor promedio), a 105° Celsius

Wt = Peso en gramos del crisol y tapa

Wi = Peso inicial, en gramos, de la biomasa y el recipiente

Wf = Peso final de, en gramos, la biomasa y el recipiente

Entre tanto la ecuación 14 y 15 para la determinación de material volátil del carbón está dada en ASTM D3175 - 17 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke.

$$Perdida\ en\ masa\ \% = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (14)$$

Donde:

A = Masa en gramos de la muestra

B = Masa en gramos de la muestra después del calentamiento

$$\%M.V = C - D \quad (15)$$

Donde:

M.V= Materia volátil, %

C = Pérdida en masa, %

D= Humedad residual, %

Para la determinación de materia volátil de las muestras y mezclas se usó un horno Hoskin Marca NET tipo FA120 y un regulador de temperatura PRISER SCIENTIFIC mostrado en la fotografía 6.

Fotografía 6: Horno Hoskin

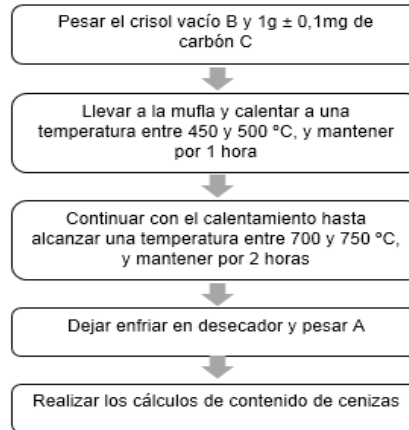


Fuente: Autor

2.3.3 Cenizas. Este método de ensayo cubre la determinación del residuo inorgánico presente en la muestra. Las cenizas se determinan pesando el residuo remanente después de quemado el carbón y biomasa bajo condiciones rigurosamente controladas de peso de muestra, temperatura, tiempo, atmósfera y especificaciones de los equipos.²⁰

El procedimiento para obtener el porcentaje de cenizas para el carbón es mostrado en el diagrama 7.

Diagrama 7: Procedimiento cenizas carbón



Fuente: Adaptado ASTM D 3174

Entre tanto la ecuación 18 para la determinación de cenizas del carbón está dada en ASTM D3174-12 Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal

$$\%Cenizas = \frac{A-B}{C} * 100 \quad (18)$$

Donde:

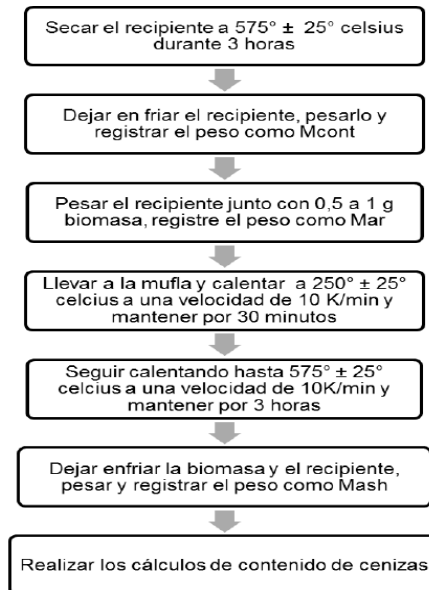
A = Peso del crisol, y cenizas, g.

B = Peso del crisol vacío, g.

C = Peso de la muestra para análisis, g.

Procedimiento para obtener el porcentaje de cenizas de la biomasa esta ilustrado en el diagrama 8.

Diagrama 8: Procedimiento cenizas biomasa



Fuente: (Adaptado por Parra William Alexander de ASTM E1757-01)

Los resultados obtenidos fueron calculados según la norma ASTM E1755-01 Standard Test Method for Ash in Biomass y las ecuaciones 16 y 17.

$$M_s = (Mar - M_{cont}) * \frac{\%T_{105}}{100} \quad (16)$$

$$Cenizas = \frac{Mash - M_{cont}}{M_s} * 100 \quad (17)$$

Dónde:

M_s = Peso, en gramos, de masa seca

$\%T_{105}$ = % sólidos totales en la muestra (valor promedio), a 105° Celsius

Cenizas = Contenido de cenizas

M_{cont} = Peso inicial, en gramos, de la biomasa y el recipiente

$Mash$ = Peso final de, en gramos, la biomasa y el recipiente

Para la determinación de cenizas de las muestras y mezclas se usó una mufla marca TERRIGENO modelo F2 que alcanza una temperatura máxima de 1200°C mostrado en la fotografía 7

Fotografía 7: Mufla



Fuente: Autor

2.3.4 Carbono fijo. El carbono fijo es calculado según la suma de los porcentajes de los ensayos de humedad, cenizas y materia volátil se les sustrae 100. Todos los porcentajes deben estar en la referencia de humedad de acuerdo a la ecuación 19.

$$CF = 100\% - (\%Cenizas - \%MV - \%HR) \quad (19)$$

Donde:

CF = Carbono fijo

%HR = % Humedad residual (valor promedio), a 105° Celsius

Cenizas = Contenido de cenizas (valor promedio)

MV = Contenido de material volátil (valor promedio)

2.4. ANÁLISIS ÚLTIMOS

2.4.1 Poder calorífico. El Poder Calorífico de un combustible es la cantidad de calor que se puede obtenerse de un combustible cuando se quema en forma completa y sus productos son enfriados hasta la temperatura original de la mezcla aire-combustible. [Kcal/kg], [Kcal / m³].²⁹

Poder Calorífico Superior (PCS): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible, cuando el vapor de agua originado en la combustión está completamente condensado.

Poder Calorífico Inferior (PCI): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible, cuando toda el agua en los productos permanece como vapor.

Fotografía 8: Bomba Calorimétrica



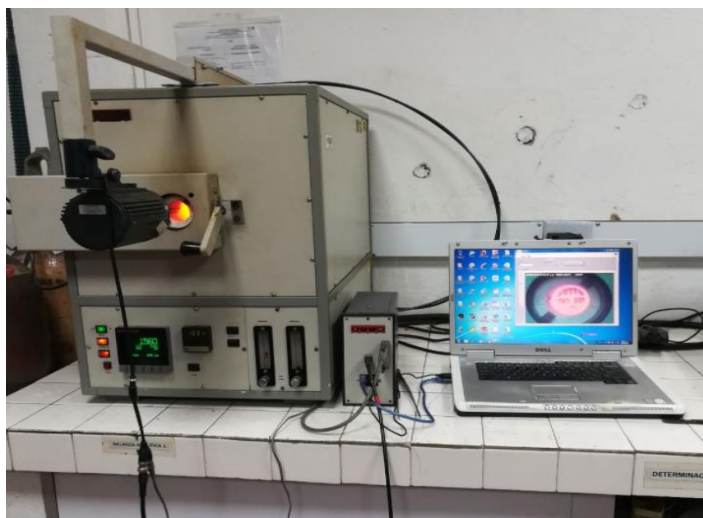
Fuente: Autor

2.4.2 Fusibilidad de cenizas. El conocimiento de las características de la fusión de las cenizas de los combustibles minerales sólidos facilita información sobre el comportamiento de los componentes inorgánicos de dichos combustibles cuando éstos son sometidos a Temperaturas elevadas. Con las cenizas de un combustible, se prepara una probeta que, bajo observación, se calienta en un horno tubular en condiciones normalizadas. Se consideran las temperaturas a las cuales la probeta sufre cambios característicos.³⁰

²⁹ Poder Calorífico. Fundamentos Teóricos. [en línea]. < <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/poder-calorifico/poder-calorifico.shtml#introduccionixzz5CmhZm0y4> > [citado 16 septiembre de 2017]

³⁰ Incar. Fusibilidad de cenizas. [en línea]. <<http://www.incar.csic.es/fusibilidad-de-cenizas>> [citado 16 septiembre de 2017]

Fotografía 9: Equipo de fusibilidad de cenizas



Fuente: Autor

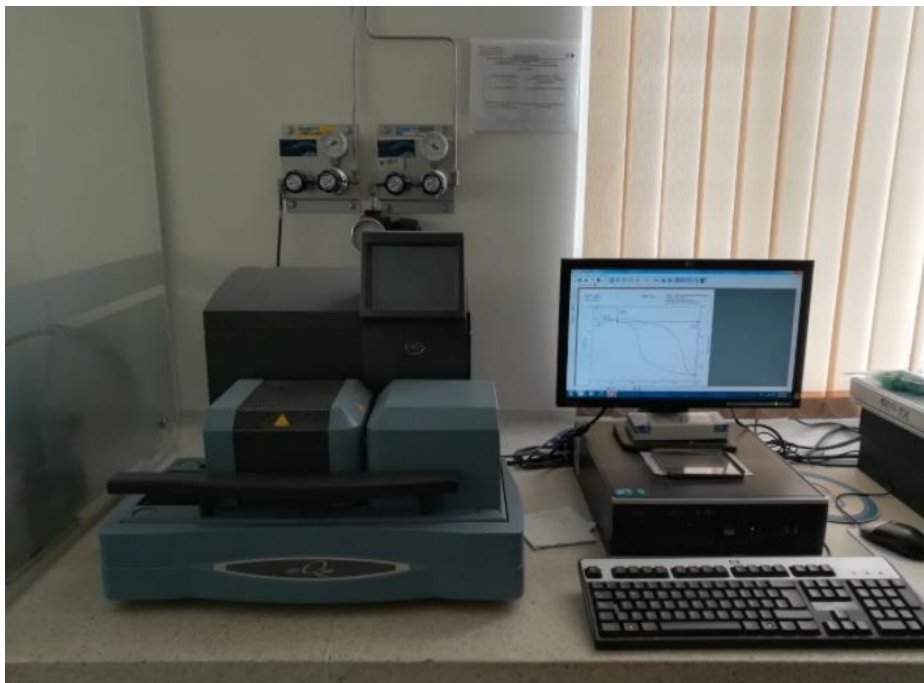
2.4.3 Termogravimetría (TGA). La técnica de Análisis Termogravimétrico, (del acrónimo inglés TGA, Thermal Gravimetric Analysis), mide la cantidad y rapidez del cambio en peso de una muestra en función de la temperatura y/o del tiempo en una atmósfera controlada. De manera general, permite realizar medidas para determinar la composición de los materiales y predecir su estabilidad a temperaturas de hasta 1500 °C. Esta técnica puede, por tanto, caracterizar materiales que presentan pérdida o ganancia de peso debido a la descomposición, oxidación o deshidratación³¹.

Análisis por TGA:

- Estabilidad térmica de materiales.
- Composición de un sistema multicomponente.
- Estudio de vida media de diversos productos.
- Estudio de descomposición cinética.
- Efecto de atmósferas reactivas y/o corrosivas en distintos materiales (estabilidad frente a oxidación, etc).
- Contenido de humedad y/o volátiles.
- Estudios de adsorción/desorción

³¹ Universidad autónoma de Madrid. Unidad de Análisis Térmico [en línea]. <https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668322022/1242666562032/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Analisis_Termico.htm> [citado 19 Marzo de 2018]

Fotografía 10: Equipo de análisis termogravimétrico (TGA)



Fuente: Autor

El equipo usado para la Termogravimetría de las muestras fue un TA instruments modelo Q 600. Ubicado en los laboratorios de INCITEMA en la Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia mostrado en la fotografía 11.

2.4.4 Sulfurometro (Contenido de azufre). El carbón contiene diversas cantidades de azufre basado en parte en la cantidad de azufre y hierro combinado en la turba mientras que se forma en carbón, y la humedad del clima durante la formación del carbón. En la combustión de carbón, un alto contenido de azufre provoca la corrosión más rápida de los equipos de metal, mientras que el azufre que se quema es también un contaminante del medio ambiente. Por estas razones, la medición del contenido de azufre en el carbón es importante para la caracterización y valorización del carbón, y un medio rápido y sencillo de monitorear los niveles de azufre en el carbón es crítico, desde la minería hasta el uso industrial³².

El equipo usado para la determinación del contenido de azufre en las muestras fue un sulfurometro marca LECO modelo S-144 DR. Ubicado en los laboratorios de carbones en la Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia mostrado en la fotografía 12.

Fotografía 11: Sulfurometro S-144 DR



Fuente: Autor

³² Rigaku, Leading with innovation. Azufre en el carbón [en línea]. <<https://www.rigaku.com/es/products/xrf/nexqc/app19>> [citado 19 Marzo de 2018]

2.5. ELABORACIÓN DE MEZCLAS Y CARACTERIZACIÓN

Seguido a la caracterización inicial de las materias primas, se diseñaron mezclas de carbón-biomasa las cuales se caracterizaron siguiendo métodos estandarizados para el carbón.

Las mezclas se hicieron con un diseño experimental, se plantea con tres réplicas, de 9 combinaciones, para definir las interacciones entre los factores analizados. A continuación, se presenta la tabla de experimentación.

Tabla 7: Tabla experimentación

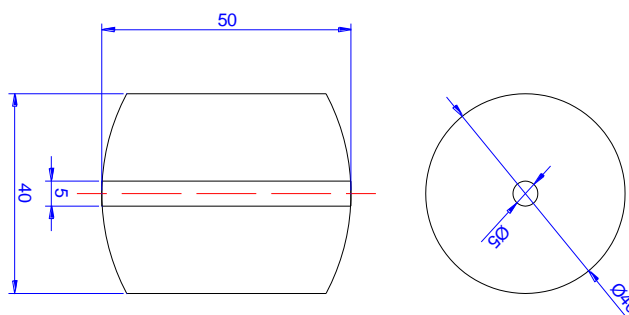
FACTORES	NIVEL 1		NIVEL 2		NIVEL 3		NIVEL 4	
RELACIÓN DE MEZCLAS	Carbón	Carbón	Carbón	Biomasa	Carbón	Biomasa	Carbón	Biomasa
	50%	50%	50%	50%	75%	25%	25%	75%
GRANULOMETRÍA	Tamaño 1			Tamaño 2			Tamaño 3	
Total, Corridas	19							

Fuente: autor

Las proporciones de las mezclas de carbón-biomasa, preparadas para la producción de briquetas, son las mostradas en la tabla 7. Las granulometrías del carbón usadas fueron por debajo de malla 30 (0.595 mm), por debajo de malla 16 (1.19 mm), por debajo de malla 8 (2.38 mm). Entre tanto la biomasa para todas las mezclas fue con granulometría por debajo de malla 16 (1.19 mm).

El tipo de briketa seleccionada fue una de tipo cilíndrica con unas curvaturas en las puntas y un pequeño agujero en el centro de esta mostrada en la fotografía 13.

Fotografía 12: Plano de la briketa



Fuente: Autor

Las presiones de conformado usadas para la fabricación de briquetas fueron de 15 MPa y aglomerando las briquetas con parafina al 15% del peso de la mezcla.

Las pruebas de gasificación fueron realizadas en un reactor de lecho fijo fotografía 14, el procedimiento que se siguió fue:

1. Ubicar la briqueta en el reactor.
2. Sellar colocando las partes móviles del reactor.
3. Encender el equipo.
4. Inyectar aire con un caudal de 2.5 ltrs/min hasta los 800°C.
5. Toma y análisis de muestra.

Fotografía 13:Reactor lecho fijo



Fuente: Autor

Los gases resultantes de la gasificación fueron analizados con el ORSAT, este equipo permite realizar un análisis volumétrico de gases en base seca, de productos derivados de la combustión; los primeros métodos de análisis volumétrico

emplearon mediciones separadas de dióxido de carbono y oxígeno, seguidos de una combustión lenta simultánea de hidrógeno y metano.

Fotografía 14: Equipo ORSAT



Fuente: Autor

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES DE LA PROVINCIA CENTRO DE BOYACÁ.

Para la determinar la composición de las mezclas se desarrollaron los análisis próximos enumerados en el procedimiento experimental bajo norma ASTM.

En la tabla 8 se muestra que tipos de carbones son los que se analizaron.

Tabla 8: Análisis próximos carbones provincia centro Boyacá.

CARBONES PROVINCIA CENTRO DE BOYACÁ													
Cálculos de resultados	Como se recibe								Base seca			Base seca libre de Cz	
	(BCSR)								(BS)			(BSLCz)	
Mina	AD L%	HR %	HT %	Cz %	M.V .%	C.F .%	F. Sl.	S %	Cz %	M.V .%	C.F .%	M.V .%	C.F .%
M1	0.97	5.87	6.78	9.06	40.84	44.23	1	0.74	8.00	39.78	43.17	39.66	43.05
M2	1.55	7.32	8.76	14.86	41.02	36.75	0.5	1.61	13.78	39.99	35.67	39.78	35.46
M3	0.29	1.13	1.42	12.58	30.26	56.03	5	0.89	11.57	29.25	55.02	29.10	54.87
M4	1.55	2.28	3.79	7.66	38.19	51.87	2	0.51	6.64	37.17	50.85	37.08	50.76
M5	0.50	2.01	2.50	16.61	34.97	46.41	1	1.57	15.59	33.95	45.39	33.74	45.18

Fuente: Grupo de investigación de carbones y carboquímica UPTC-Tunja

La clasificación por rango de los carbones analizados se hizo según la norma ASTM D 388. En la cual se dan lineamientos sobre qué tipo de carbón es según su composición. Todos los carbones analizados fueron de bajo rango y de tipo subituminosos tabla 9.

Tabla 9: Rango de Carbones según ASTM D388

Mina	Rango del carbón
M1	Subituminoso

M2	Subituminoso
M3	Subituminoso
M4	Subituminoso
M5	Subituminoso

Fuente: Grupo de investigación de carbones y carboquímica UPTC-Tunja

Las propiedades gasificables de los carbones de bajo rango están dadas según la tabla 10.

Tabla 10: Rangos de propiedades gasificables de los carbones

Intervalos	Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	Cenizas	azufre
Subituminoso					
Valores mínimos	2.4	22	24.5	6.3	0.2
Valores máximos	20.2	51.8	53.1	50.4	2.1

Fuente: Co-gasification of Woody biomass and coal with air and steam Kumabe

Como se puede observar todos los carbones que se tienen ofrecieron condiciones idóneas para la gasificación. Con lo cual se van a tomar los carbones M1 y M2 ambos subituminosos para comprobar cual ofrece las mejores propiedades a la hora de gasificar.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA (*CHENOPODIUM ÁLBUM*)

En la tabla 11, están documentados los análisis próximos que se obtuvieron de la biomasa.

Tabla 11: Análisis próximos biomasa

Chenopodium álbum cenizo						
En verde	Base seca					
Humedad total en verde%	HT%	Cz%	M.V.%	C.F. %	F.S.I.	S%
72.16	5.55	14.79	63.63	16	1	0.26

Fuente: Autor

El contenido de cenizas, carbono fijo y azufre es muy bajo, en comparación con el carbón debido a que su contenido de material volátil es mucho más alto 63.63%.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CARBÓN-BIOMASA

3.3.1 Humedad. La humedad, está representada por la cantidad de agua por unidad de masa de solido seco, en una muestra. La humedad se clasifica en dos categorías, la humedad libre que es la absorbida por la superficie del sólido, y la humedad ligada que está asociada al contenido de agua en los capilares y poros de las estructuras celulares.

Tabla 12: Contenido de humedad mezclas M1-Biomasa

HUMEDAD MEZCLAS					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%Humedad
1	M1	Malla 8	25	75	6.16666666
2	M1	Malla 8	50	50	5.93333333
3	M1	Malla 8	75	25	5.82
4	M1	Malla 16	25	75	6.152333
5	M1	Malla 16	50	50	6.01111111
6	M1	Malla 16	75	25	5.96222222
7	M1	Malla 30	25	75	6.23333333
8	M1	Malla 30	50	50	5.96
9	M1	Malla 30	75	25	5.87777777

Fuente: Autor

Con respecto a la humedad relativa del carbón, la adición de biomasa al carbón aumenta el contenido de humedad en 0.1% y 0.5%, un resultado esperado dado que la biomasa fue secada previamente a 105 °C.

Tabla 13: Contenido de humedad mezclas M2-Biomasa

HUMEDAD MEZCLAS					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%Humedad

1	M2	Malla 8	25	75	7.68333333
2	M2	Malla 8	50	50	7.39666667
3	M2	Malla 8	75	25	7.70666667
4	M2	Malla 16	25	75	7.35333333
5	M2	Malla 16	50	50	7.63
6	M2	Malla 16	75	25	7.68666667
7	M2	Malla 30	25	75	7.79666667
8	M2	Malla 30	50	50	7.58666667
9	M2	Malla 30	75	25	7.61

Fuente: Autor

En análisis no se observa una tendencia evidente, los datos están dentro un rango cercano. Con lo anterior se puede concluir que las composiciones de las mezclas no afectan la humedad relativa.

Tabla 14: Contenido de humedad mezcla M1-M2

HUMEDAD MEZCLAS				
	G. carbón	% carbón 1	% carbón 2	%Humedad
1	Malla 8	50	50	7.77
2	Malla 16	50	50	7.69
3	Malla 30	50	50	7.65

Fuente: Autor

Comparado a la humedad relativa del carbón que es de 7.32%, la adición de carbón M1 aumenta el contenido de humedad en 0.1% y 0.5%, un contenido muy poco significativo para tener en cuenta.

3.3.2 Material volátil. La materia volátil (%MV) hace referencia a los compuestos orgánicos, que son liberados durante el calentamiento, y estos compuestos pueden ser condensables o no condensables.

Tabla 15: Contenido de Material volátil mezcla M1-Biomasa

VOLATILES MEZCLAS					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%Volátiles
1	M1	Malla 8	25	75	57.3955555

2	M1	Malla 8	50	50	52.9833333
3	M1	Malla 8	75	25	45.2655555
4	M1	Malla 16	25	75	58.6777777
5	M1	Malla 16	50	50	50.1222222
6	M1	Malla 16	75	25	47.6599999
7	M1	Malla 30	25	75	58.2322222
8	M1	Malla 30	50	50	54.8111111
9	M1	Malla 30	75	25	48.1444444

Fuente: Autor

En relación con el contenido de materias volátiles del carbón es de 41.07% en bruto, el porcentaje M.V. aumenta significativamente en las mezclas con mayor cantidad de biomasa, esto como consecuencia de los altos contenidos de volátiles de la biomasa que es de 63.63%.

Tabla 16: Contenido de Material volátil M2-Biomasa

VOLATILES MEZCLAS					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%Volátiles
1	M2	Malla 8	25	75	57.4433333
2	M2	Malla 8	50	50	53.4866667
3	M2	Malla 8	75	25	45.8933333
4	M2	Malla 16	25	75	59.2966667
5	M2	Malla 16	50	50	49.9466667
6	M2	Malla 16	75	25	48.0033333
7	M2	Malla 30	25	75	58.6766667
8	M2	Malla 30	50	50	55.3166667
9	M2	Malla 30	75	25	48.2066667

Fuente: Autor

El agregado de biomasa incrementa los volátiles de las mezclas, debido a esto las briquetas fabricadas con mayor contenido de biomasa tendrán un punto de ignición más bajo, con esto presentarán un encendido más rápido que las briquetas elaboradas de 100% carbón.

Tabla 17: Contenido de Material Volátil M1-M2

MATERIAL VOLÁTIL MEZCLAS				
	G. carbón	% carbón 1	% carbón 2	%Volátiles
1	Malla 8	50	50	40.98
2	Malla 16	50	50	40.65
3	Malla 30	50	50	40.91

Fuente: Autor

Dado a la proporción y contenido de material volátil de los carbones de la mezcla M1-M2, no se tiene un cambio significativo. Lo anterior es coherente debido a que su contenido de M.V es muy cercano M1= 40.84% y M2= 41.07 %.

3.3.3 Cenizas. El contenido de cenizas hace referencia al residuo inorgánico que queda luego de someter el material a combustión, este residuo se compone principalmente de sodio, potasio, calcio, hierro, manganeso, cloro y metales pesados.

Tabla 18: Contenido de cenizas mezcla M1-Biomasa

CENIZAS MEZCLAS					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%Cenizas
1	M1	Malla 8	25	75	9.13564151
2	M1	Malla 8	50	50	11.8451987
3	M1	Malla 8	75	25	11.9084468
4	M1	Malla 16	25	75	10.8741325
5	M1	Malla 16	50	50	11.3854184
6	M1	Malla 16	75	25	11.0876189
7	M1	Malla 30	25	75	13.6845484
8	M1	Malla 30	50	50	15.3468469
9	M1	Malla 30	75	25	15.9898756

Fuente: Autor

La biomasa presenta cenizas del 14.79 %, al agregar está a las mezclas no aumenta representativamente el contenido de cenizas, siendo el carbón el que influye en el aumento de contenido de cenizas dependiendo de su granulometría.

Tabla 19: Contenido de cenizas mezcla M1-Biomasa

CENIZAS MEZCLAS					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%Cenizas
1	M2	Malla 8	25	75	14.9838341
2	M2	Malla 8	50	50	16.4138824
3	M2	Malla 8	75	25	16.4838758
4	M2	Malla 16	25	75	15.1523181
5	M2	Malla 16	50	50	16.3944264
6	M2	Malla 16	75	25	15.6843774
7	M2	Malla 30	25	75	18.3187755
8	M2	Malla 30	50	50	20.3013531
9	M2	Malla 30	75	25	21.2733345

Fuente: Autor

Dado el porcentaje inicial de cenizas del carbón de 14.86%, el contenido de cenizas en mezclas con carbón de granulometría bajo malla 8 y 16 tiene un aumento máximo de 1.62%, en contraste con la granulometría bajo malla 30 que tiene un aumento máximo de cenizas de 6.41%. Lo anterior como consecuencia de la mayor concentración de ceniza en los finos de carbón.

Tabla 20: Contenido de cenizas mezcla M1-M2

CENIZAS MEZCLAS				
	G. carbón	% carbón 1	% carbón 2	%Cenizas
1	Malla 8	50	50	12.29
2	Malla 16	50	50	12.36
3	Malla 30	50	50	12.54

Fuente: Autor

La mezcla de carbón M1-M2 aumento su contenido cenizas al 12.3% ± 0.3 , con respecto al carbón M1 que tiene un 9.06%, esto debido a que en el carbón M2 se presenta un contenido mucho mayor de cenizas de 14.86%. Lo que significó un aumento del 3% ± 0.3 , que es bastante considerable para tener en cuenta.

3.3.4 Carbono fijo. El contenido de carbono fijo hace referencia a la cantidad de materia orgánica, que queda después de la combustión. A pesar de que no se cuenta con un método directo para su cuantificación, se realiza por medio de la sustracción de materia volátil, cenizas y humedad, del contenido original.

Tabla 21: Carbono fijo mezclas M1-Biomasa

CARBONO FIJO MEZCLAS								
N o	Muestr a carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	% Humedad	% Volátiles	% Cenizas	% CARBONO FIJO
1	M1	Malla 8	25	75	6.16666666	57.3955555	9.13564151	27,3021363
2	M1	Malla 8	50	50	5.93333333	52.9833333	11.8451987	29,2381347
3	M1	Malla 8	75	25	5.82	45.2655555	11.9084468	37,0059977
4	M1	Malla 16	25	75	6.152333	58.6777777	10.8741325	24,2957567
5	M1	Malla 16	50	50	6.01111111	50.1222222	11.3854184	32,4812483
6	M1	Malla 16	75	25	5.96222222	47.6599999	11.0876189	35,290159
7	M1	Malla 30	25	75	6.23333333	58.2322222	13.6845484	21,8498961
8	M1	Malla 30	50	50	5.96	54.8111111	15.3468469	23,882042
9	M1	Malla 30	75	25	5.87777777	48.1444444	15.9898756	29,9879022

Fuente: Autor

A medida que aumenta la granulometría del carbón entre malla 8, 16 a 30 el carbono fijo disminuye considerablemente, lo anterior debido al mayor contenido de cenizas en los finos del carbón.

Tabla 22: Carbono fijo mezclas M2-Biomasa

CARBONO FIJO MEZCLAS								
N o	Muestr a carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	% Humedad	% Volátiles	% Cenizas	% Carbono fijo
1	M2	Malla 8	25	75	7.683333	57.44333	14.98383	19.88949928
2	M2	Malla 8	50	50	7.396667	53.48667	16.41388	22.70278428
3	M2	Malla 8	75	25	7.706667	45.89333	16.48388	29.91612417
4	M2	Malla 16	25	75	7.353333	59.29667	15.15232	18.1976819
5	M2	Malla 16	50	50	7.63	49.94667	16.39443	26.02890689
6	M2	Malla 16	75	25	7.686667	48.00333	15.68438	28.62562256

7	M2	Malla 30	25	75	7.796667	58.67667	18.31878	15.20789121
8	M2	Malla 30	50	50	7.586667	55.31667	20.30135	16.79531353
9	M2	Malla 30	75	25	7.61	48.20667	21.27333	22.90999886

Fuente: Autor

El carbono fijo del carbón es de 36.75%, al agregar biomasa se disminuye entre 6.84% y 21.55%, esto a causa del contenido de carbono fijo en la biomasa es menor que el de carbón.

Tabla 23:Carbono fijo mezclas M1-M2

CARBONO FIJO MEZCLAS							
	Gra. carbón	% carbón 1	% carbón 2	% Humedad	% Volátiles	% Cenizas	% Carbono fijo
1	Malla 8	50	50	7.77	40.98	12.29	38,96
2	Malla 16	50	50	7.69	40.65	12.36	39,3
3	Malla 30	50	50	7.65	40.91	12.54	38,9

Fuente: Autor

En comparación con la M1. La mezcla M1-M2 tuvo una reducción significativa (aproximadamente de 5.18%), esto debido a que el carbono fijo de M2(C.F.=36.75%) es notablemente inferior al de M1(C.F.=44.23%).

3.3.5 Contenido de azufre

Tabla 24: Contenido de azufre M1-Biomasa

CONTENIDO DE AZUFRE					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%S
1	M1	Malla 8	25	75	0.354684
2	M1	Malla 8	50	50	0.584684
3	M1	Malla 8	75	25	0.766846
4	M1	Malla 16	25	75	0.361258
5	M1	Malla 16	50	50	0.575628

6	M1	Malla 16	75	25	0.794454
7	M1	Malla 30	25	75	0.368443
8	M1	Malla 30	50	50	0.598551
9	M1	Malla 30	75	25	0.805284
11	M1	Malla 8	100	0	0.84845
12	M1	Malla 16	100	0	0.87231
13	M1	Malla 30	100	0	0.89825

Fuente: Autor

La biomasa no aporta azufre a las mezclas, pues en su estado natural no lo posee en proporciones altas. Por lo cual, a mayor biomasa agregada al carbón, menor serán los índices de azufre en el proceso de gasificación.

Tabla 25:Contenido de azufre M2-Biomasa

CONTENIDO DE AZUFRE					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	%S
1	M2	Malla 8	25	75	0.689755
2	M2	Malla 8	50	50	0.961125
3	M2	Malla 8	75	25	1.27225
4	M2	Malla 16	25	75	0.65022
5	M2	Malla 16	50	50	0.99853
6	M2	Malla 16	75	25	1.40245
7	M2	Malla 30	25	75	0.65551
8	M2	Malla 30	50	50	1.01068
9	M2	Malla 30	75	25	1.43145
11	M2	Malla 8	100	0	1.59846
12	M2	Malla16	100	0	1.61846
13	M2	Malla 30	100	0	1.68488

Fuente: Autor

A pesar de que el carbón tiene un contenido alto de azufre la biomasa en proporciones significativas logra reducir este contenido favoreciendo la gasificación final.

Tabla 26: Contenido de Azufre M1-M2

AZUFRE MEZCLAS				
	G. carbón	% carbón 1	% carbón 2	%Azufre
1	Malla 8	50	50	1.28668
2	Malla 16	50	50	1.30864
3	Malla 30	50	50	1.38647

Fuente: Autor

3.3.6 Índice de hinchamiento (FSI). El índice de hinchamiento es usado para ver que los carbones que capacidad de aglomeración tienen estos.

Tabla 27: Índice de hinchamiento (FSI) M1-Biomasa

ÍNDICE DE HINCHAMIENTO FSI					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	FSI
1	M1	Malla 8	25	75	0.5
2	M1	Malla 8	50	50	1.5
3	M1	Malla 8	75	25	1.5
4	M1	Malla 16	25	75	0.5
5	M1	Malla 16	50	50	1.5
6	M1	Malla 16	75	25	1
7	M1	Malla 30	25	75	0.5
8	M1	Malla 30	50	50	1
9	M1	Malla 30	75	25	1.5

Fuente: Autor

Las diferentes mezclas M1-Biomasa no presentan ninguna aglomeración significativa por lo que no son aptas en procesos de coquización, y si favorecerían la gasificación.

Tabla 28:Índice de hinchamiento (FSI) M2-Biomasa

ÍNDICE DE HINCHAMIENTO FSI					
	Muestra carbón	G. carbón	% carbón	% biomasa	FSI
1	M2	Malla 8	25	75	0
2	M2	Malla 8	50	50	1
3	M2	Malla 8	75	25	1
4	M2	Malla 16	25	75	0
5	M2	Malla 16	50	50	1
6	M2	Malla 16	75	25	1
7	M2	Malla 30	25	75	0
8	M2	Malla 30	50	50	1
9	M2	Malla 30	75	25	1

Fuente: Autor

Las diferentes mezclas M2-Biomasa no presentan ninguna aglomeración significativa por lo que no son aptas en procesos de coquización, y si favorecerían la gasificación

Tabla 29: Índice de hinchamiento (FSI) M1-M2

ÍNDICE DE HINCHAMIENTO FSI				
	G. carbón	% carbón 1	% carbón 2	FSI
1	Malla 8	50	50	1
2	Malla 16	50	50	1
3	Malla 30	50	50	1

Fuente: Autor

Las diferentes mezclas carbón M1-M2, no presentan ninguna aglomeración significativa por lo que no son aptas en procesos de coquización, con lo cual favorecerían la gasificación

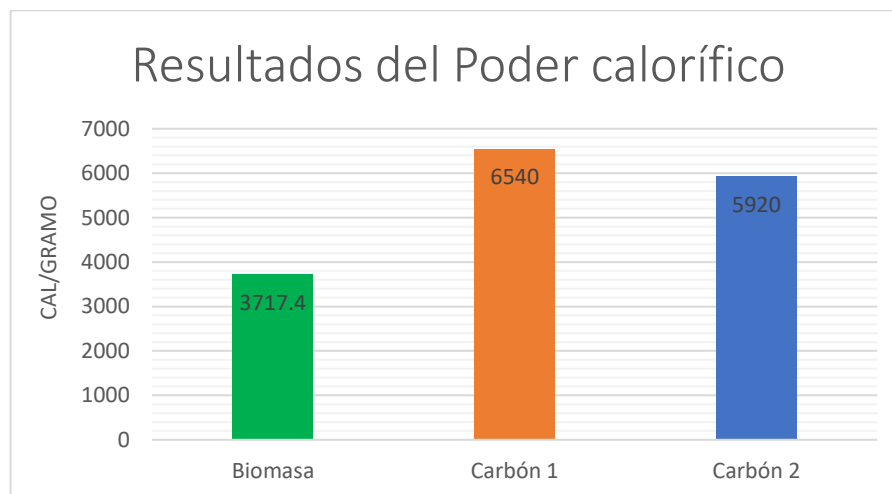
3.3.7 Poder calorífico. Este ensayo fue realizado en la Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia con sede en Sogamoso Boyacá, por el instituto de recursos minero-energéticos en el laboratorio de carbones.

Tabla 30: Resultados del Poder calorífico

MUESTRA	PODER CALORÍFICO
Biomasa	3717,4 cal/gramo
Carbón 1	6540 cal/gramo
Carbón 2	5920 cal/gramo

Fuente: Autor

Gráfica 1: Poder calorífico



Fuente: Autor

Se observa el que poder calorífico más elevado de las muestras puras, es de los carbones 1 y 2. Entre tanto, la biomasa tiene un poder calorífico aproximadamente un poco mayor a la mitad de estos. Lo anterior es lógico debido a que los carbones tienen una mayor cantidad de carbono fijo que las biomásas. Por lo cual es más fácil para estos generar calor.

Tabla 31: Poder calorífico de las mezclas

MUESTRA	RELACIÓN DE MEZCLAS		PODER CALORÍFICO
	Biomasa*	Carbón 1**	
Mezcla (Biomasa-M2)	75%	25%	3935,9 cal/gramo
Mezcla (Biomasa-M2)	50%	50%	4564,8 cal/gramo
Mezcla (Biomasa-M2)	25%	75%	5171,1 cal/gramo
Mezcla (Biomasa-Carbón 1)	25%	75%	5576,4 cal/gramo
Mezcla (M1-M2)	Carbón 1	Carbón 2***	6050,2 cal/gramo
	50%	50%	

Fuente: Autor

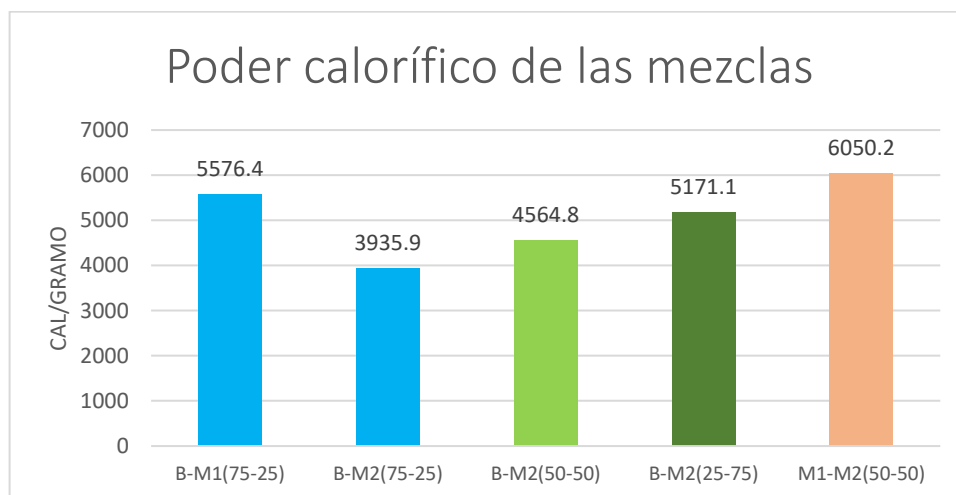
* La granulometría usada para las mezclas de la biomasa es por debajo de malla 8.

** La granulometría usada para las mezclas del carbón 1 es por debajo de malla 16.

*** La granulometría usada para las mezclas del carbón 2 es por debajo de malla 16.

A medida que se aumenta la cantidad de biomasa en las mezclas se observa un decremento en la generación de calor de estas, esto se debe a que el carbono fijo que tiene la biomasa es menor al que tienen los carbones. Dando como resultado que en la mezcla de carbón-biomasa baje el contenido de carbono fijo de esta.

Gráfica 2: Poder calorífico de las mezclas



Fuente: Autor

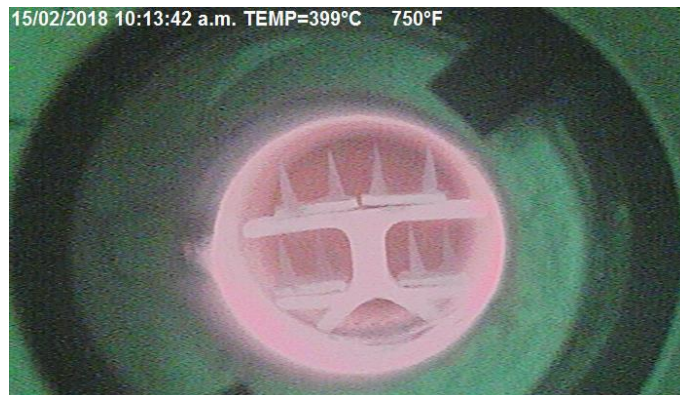
La mezcla de (carbón 1 (50%) - carbón 2 (50%)), fue la que generó mayor cantidad de calor por gramo. Sin embargo, es menor que la del carbón 1 por sí solo. Esto debido a que el poder calorífico del carbón 2 es menor que el del carbón 1, dando como resultado una baja en este aspecto en la mezcla.

3.3.8 Fusibilidad de cenizas. En esta sección se presentarán los ensayos realizados a las cenizas de las muestras de carbón M1, M2, biomasa y mezcla 75-25 de ambas muestras de carbón. Y temperaturas de deformación IT, ST, HT y FT de cada una de estas.

La atmósfera usada para el ensayo es de tipo oxidante con lo cual se inyecta oxígeno a la cámara a una temperatura de 400°C para todas las muestras y se da por terminado a los 1380°C, que es una temperatura mayor a la del proceso de gasificación.

A continuación, se presenta la fusibilidad de cenizas de los carbones M1 y M2, izquierda y derecha respectivamente fotografías 16, 17 y 18.

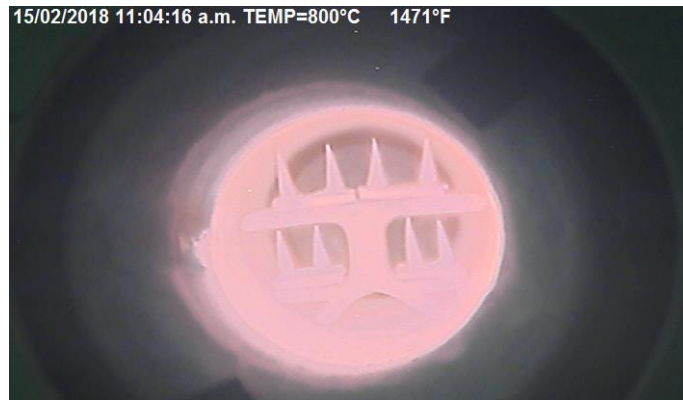
Fotografía 15: Inicio de inyección de oxígeno



Fuente: Autor

A esta temperatura no se observa ningún tipo de cambio en las pirámides de ceniza.

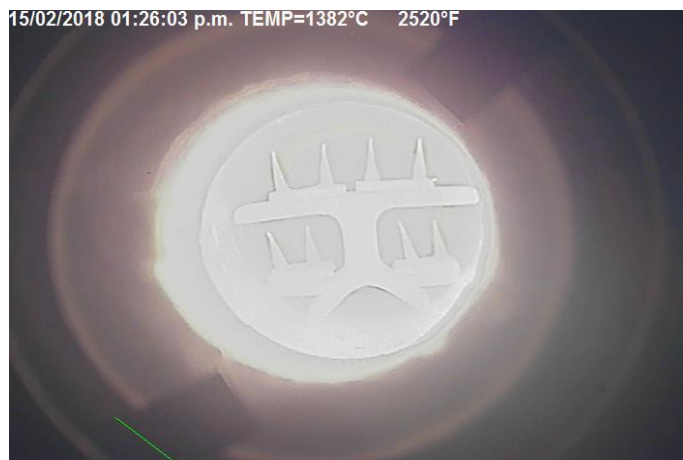
Fotografía 16: Fusibilidad cenizas (carbón)



Fuente: Autor

En la fotografía 17 a una temperatura de 800°C, se observa que no sucede ningún cambio en las pirámides.

Fotografía 17: Final del proceso



Fuente: Autor

Se puede observar una reducción de tamaño con respecto a las pirámides iniciales las pirámides iniciales.

Fotografía 18: Pirámides cenizas de carbón M1 y M2 despues del proceso

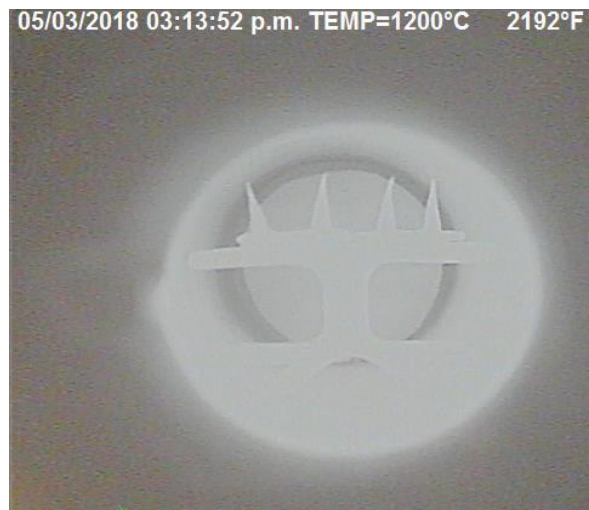


Fuente: Autor

Las puntas de las pirámides no presentan ninguna deformación tanto las cenizas de carbón M1 y M2.

A continuación, se presenta la fusibilidad de cenizas de la biomasa ilustradas en las fotografías 20-25.

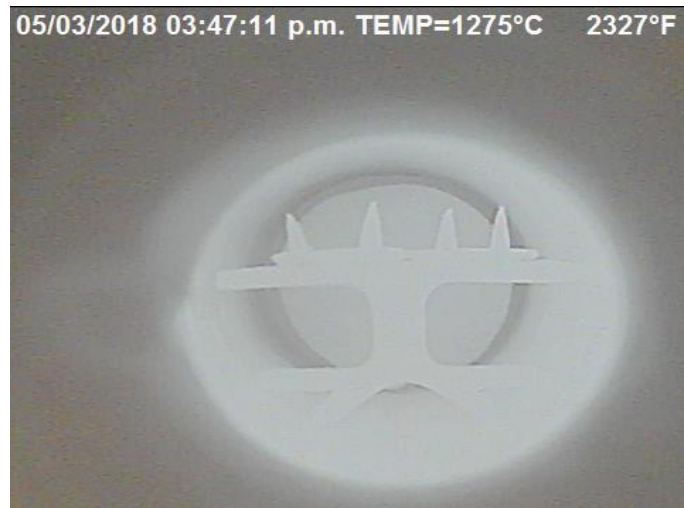
Fotografía 19: Proceso Fusibilidad de cenizas (Biomasa)



Fuente: Autor

Se observa que a los 1200°C hubo una reducción de tamaño en las pirámides, pero sus puntas no presentan ninguna deformación.

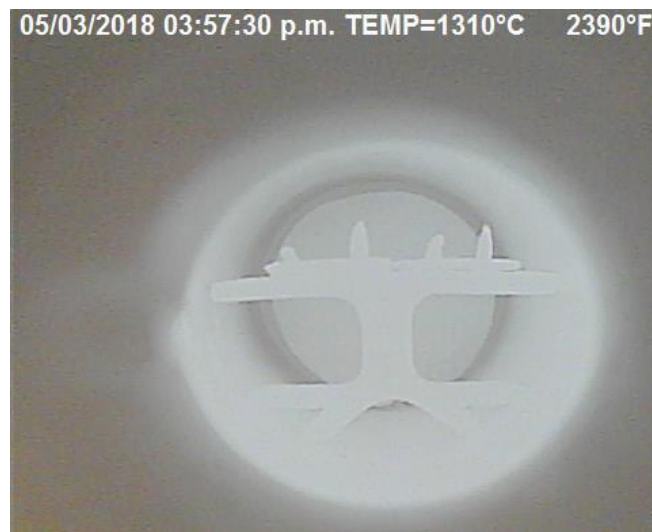
Fotografía 20: Temperatura IT para biomasa



Fuente: Autor

En la fotografía número 21 se puede observar que a una temperatura de 1275°C, se presenta una deformación inicial de la punta en todas las pirámides de biomasa y se le da por nombre temperatura IT.

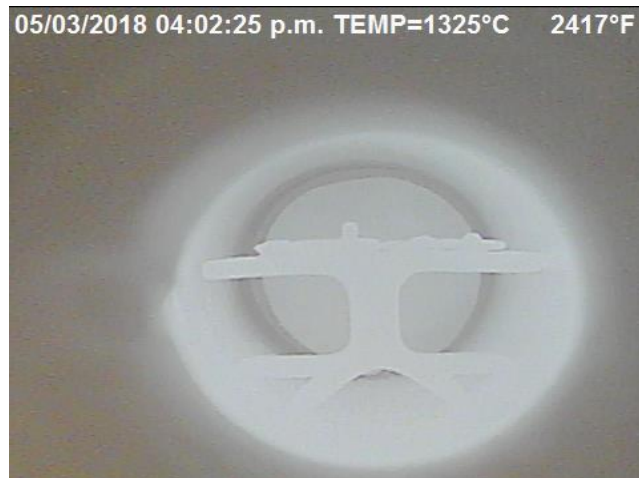
Fotografía 21: Temperatura ST (Biomasa)



Fuente: Autor

Al llegar a los 1310°C se presenta una deformación secundaria en la cual las pirámides llegan a la mitad del tamaño inicial. Este punto es conocido como temperatura ST o temperatura de ablandamiento figura 22.

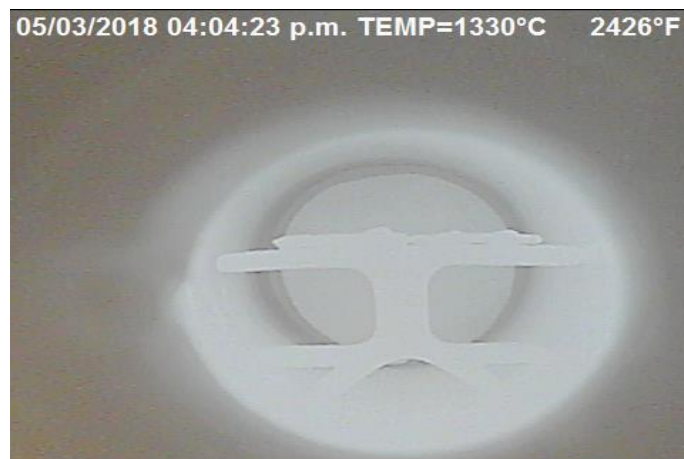
Fotografía 22: Temperatura HT (Biomasa)



Fuente: Autor

Cuando la temperatura alcanza los 1325°C el cono se ha fusionado a un bulto hemisférico y la altura es la mitad del ancho de la base

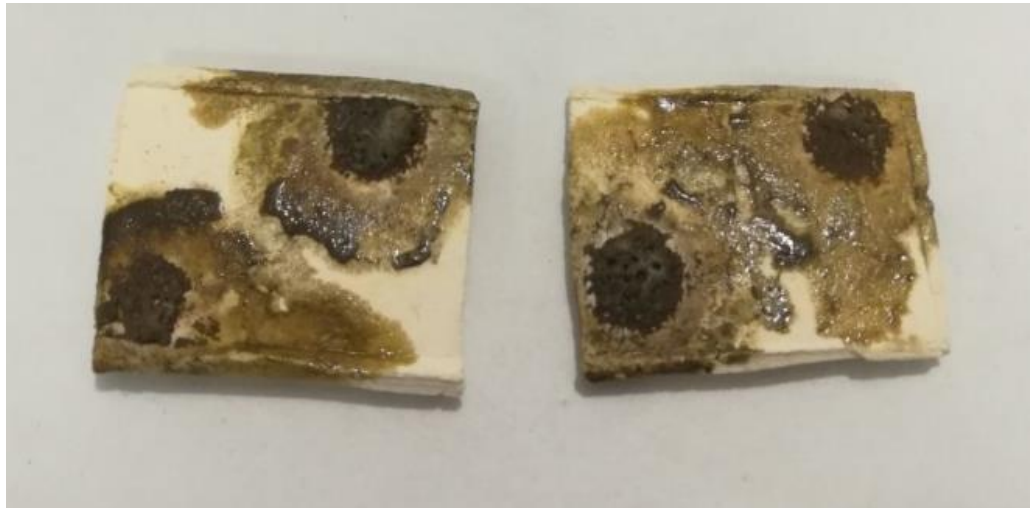
Fotografía 23: Temperatura HT (Biomasa)



Fuente: Autor

A los 1330°C Las pirámides desaparecen por completo fusionándose con la base y dando el proceso por finalizado.

Fotografía 24: Bases después del proceso de fusibilidad (Biomasa)



Fuente: Autor

En la fotografía 25 se puede observar como después de finalizar el proceso las bases donde repasaban las pirámides aparecen residuos sólidos vítreos de estas.

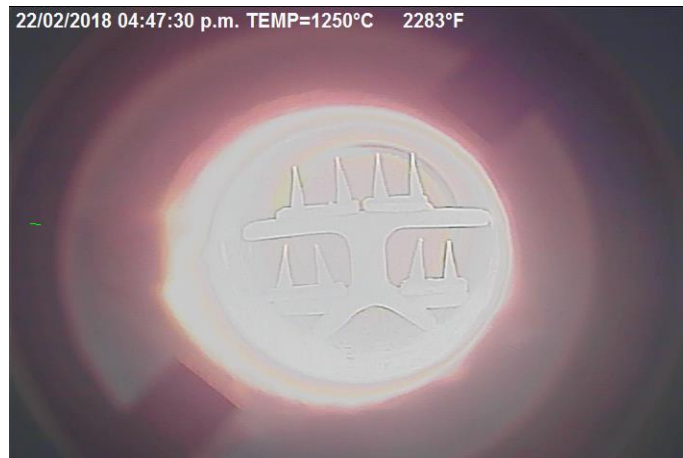
Tabla 32: Resultados fusibilidad ceniza de Biomasa

Temperaturas de deformación	Temperaturas en grados Celsius
IT	1275
ST	1310
HT	1325
FT	1330

Fuente: Autor

A continuación, se presenta la fusibilidad de cenizas de las mezclas de carbón Malla 16; M1(izquierda) y M2(derecha) con biomasa, las cuales serán ilustradas en las fotografías 26-31.

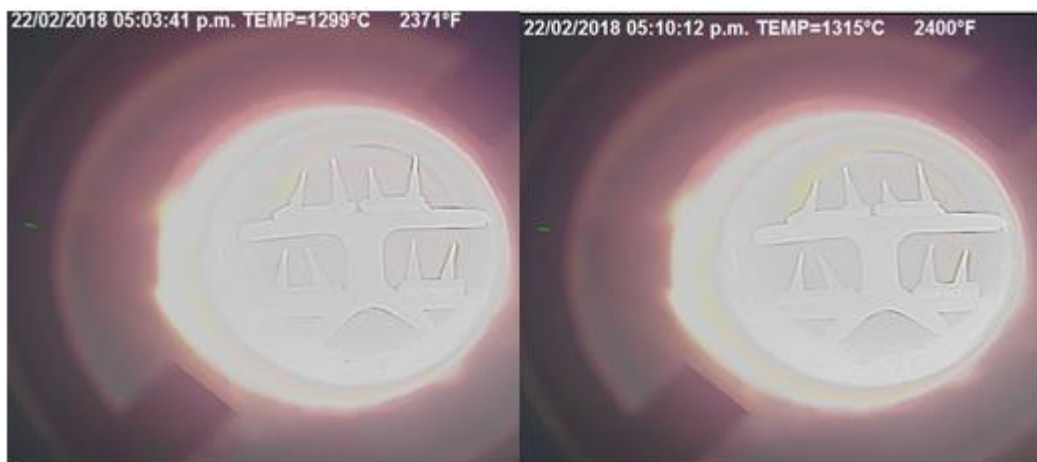
Fotografía 25: Proceso fusibilidad de cenizas (Mezclas)



Fuente: Autor

Se puede observar una reducción de tamaño con respecto a las pirámides iniciales las pirámides iniciales, sin embargo, no se presenta deformación alguna en las puntas de estas (Fotografía 26).

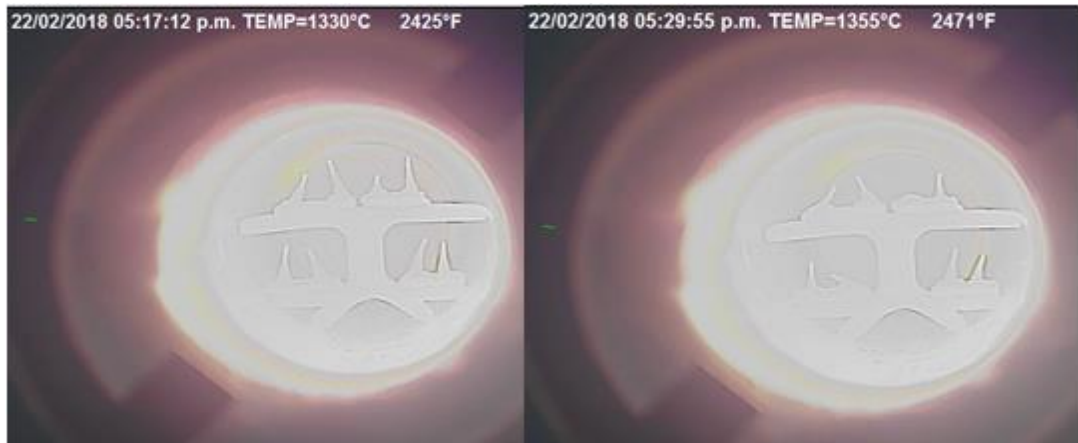
Fotografía 26: Temperatura IT para mezclas



Fuente: Autor

Las pirámides no presentan una deformación inicial clara y se estima que esta en un rango de temperatura de 1299°C a 1315°C (temperatura IT). Fotografía 27.

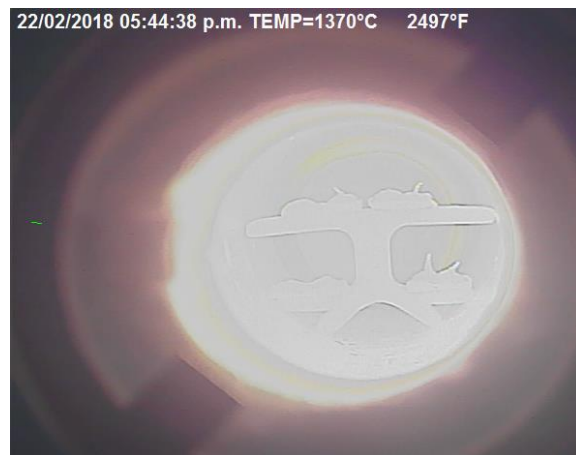
Fotografía 27: Temperatura ST para mezclas



Fuente: Autor

En la fotografía 28 se pudo apreciar como entre 1330°C a 1355°C se presenta una la deformación ST siendo más claro para la mezcla con carbón M1.

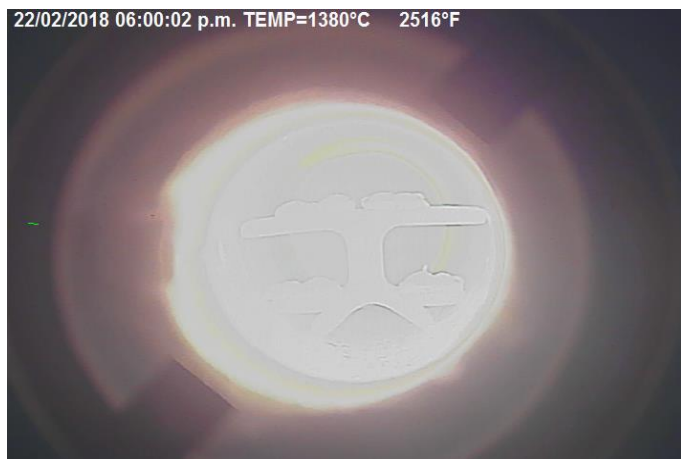
Fotografía 28: Temperatura HT para mezclas



Fuente: Autor

A los 1370°C las mezclas alcanzan el punto HT siendo mas notorio en la mezcla con carbón M1.

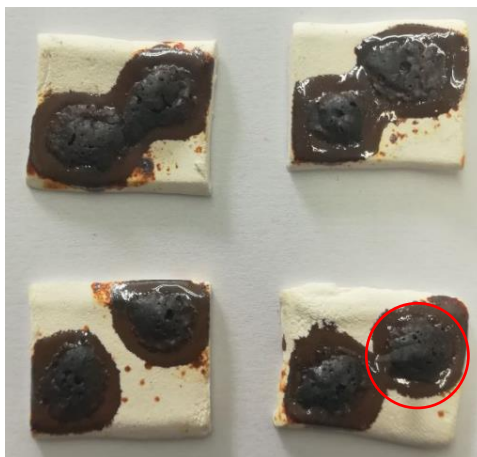
Fotografía 29: Temperatura HT para mezclas



Fuente: Autor

El proceso se da por terminado a los 1380°C, se puede observar que las cenizas de la mezcla M1-biomasa se fundieron de manera completa y que la mezcla M2-biomasa tienen una pirámide que no se fundió completamente.

Fotografía 30: Bases después del proceso de fusibilidad (Mezclas)



Fuente: Autor

En la fotografía 31 se puede observar como después de finalizar el proceso las bases donde repasaban las pirámides aparecen residuos sólidos vítreos de estas. En el círculo rojo indicado aparece la pirámide que no se fundió completamente.

Tabla 33: Resultados fusibilidad ceniza Carbón (malla 16)-Biomasa.

Temperaturas de deformación	Temperaturas en grados Celsius
IT	1299-1315
ST	1330-1355
HT	1370
FT	1380

Fuente: Autor

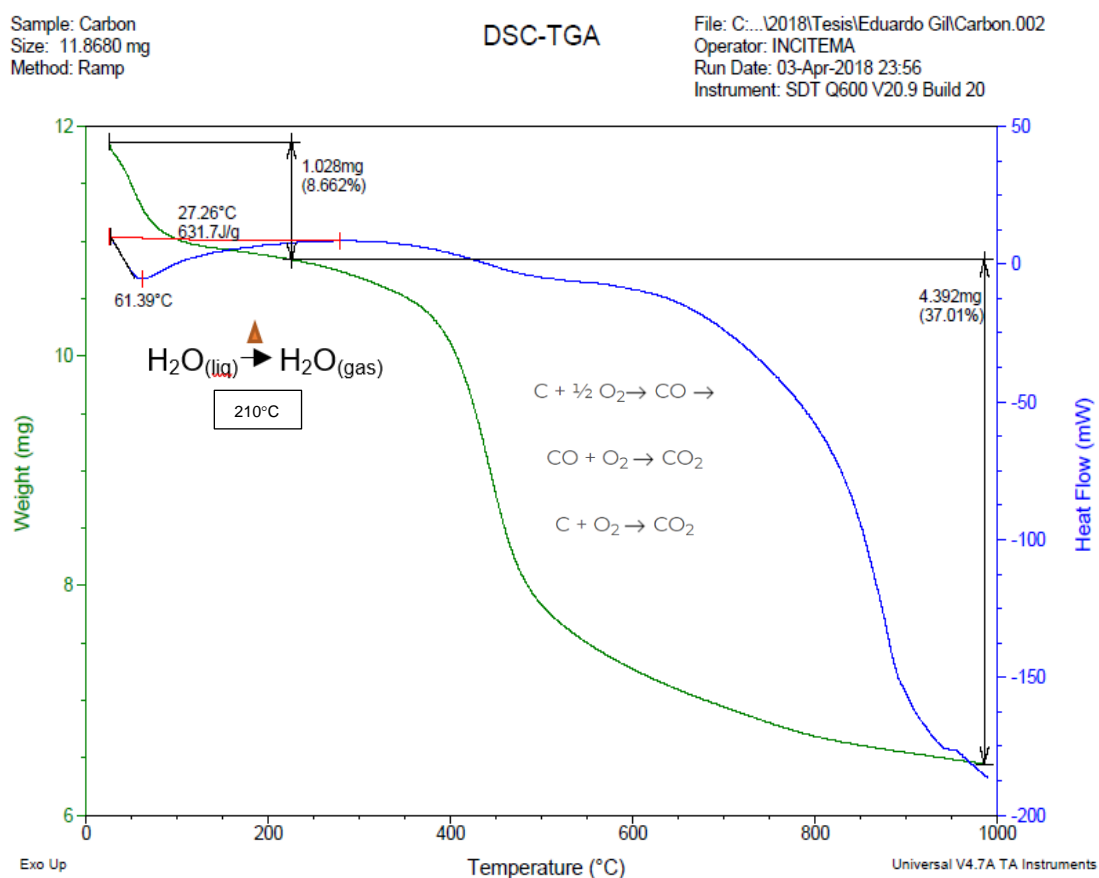
Como se observa las cenizas de los carbones M1 y M2 tienen un mayor punto de fusión, esto debido a que están compuestas por silicatos especialmente lo que las hace muy resistentes al calor.

Entre tanto que las cenizas de biomasa tienen compuestos inorgánicos que tienen puntos de fusión altos 1330°C máximo, para el proceso gasificación no afectaría puesto que esta se realiza a temperaturas más bajas de máximo 800°C.

Las cenizas de la mezcla de Carbón-biomasa en comparación con la de las cenizas del carbón unitario bajan, caso contrario con las cenizas de biomasa unitaria que suben. Esto debido a que la mayor proporción de carbón en la mezcla da como resultado que las cenizas de la mezcla tengan un punto de fusión de 1380°C

3.3.9 Termogravimetría. En esta sección se presentarán los ensayos de Termogravimetría (TGA) y Differential Scanning Calorimetry (DSC) realizados de las muestras de carbón M2, biomasa y mezcla 75-25 M2- biomasa.

Gráfica 3: TGA Carbón M2

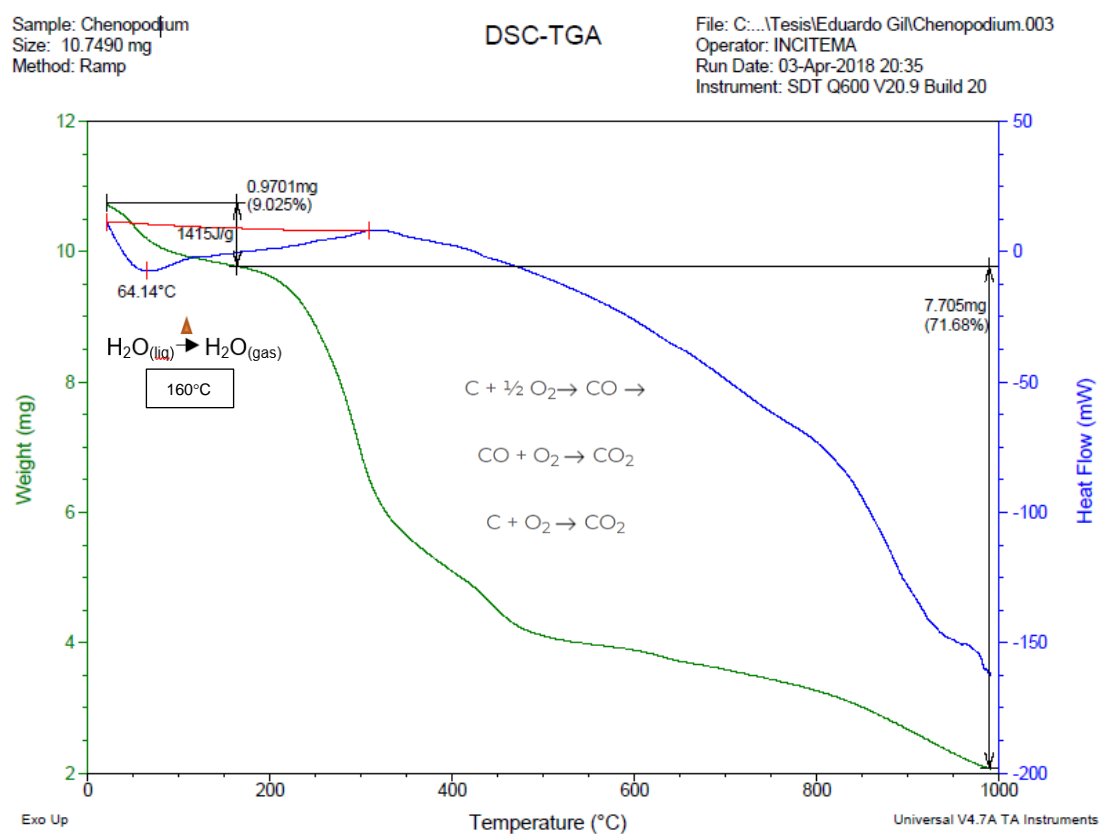


Fuente: INCITEMA, UPTC.

Para este ensayo se usó una muestra de carbón M2(malla 16) de 11.8680 mg. La grafica azul describe una reacción endotérmica la cual sucede a 61.39°C y necesito una energía de 631.7 J/g para llevarse a cabo, como consecuencia se perdió 1.028 mg 8.662% de peso. Posiblemente esta perdida de peso esté relacionada con la humedad superficial del carbón.

Después de los 220°C inicio una descomposición de lo que se podría nombrar como material volátil finalizando cerca de los 1000°C y en la cual el valor de peso perdido por la muestra es de 4.392mg equivalente a un 37.01%.

Gráfica 4: TGA biomasa (*Chenopodium*)

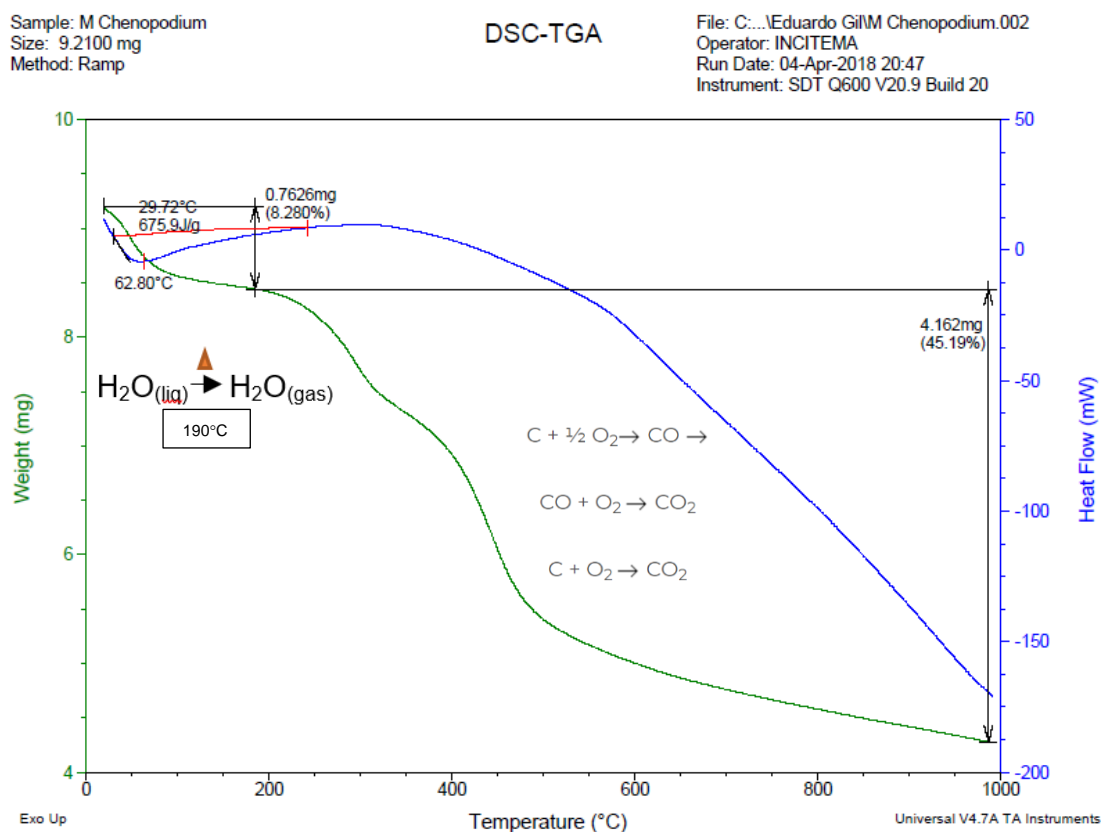


Fuente: INCITEMA, UPTC.

Para este ensayo se usó una muestra de biomasa de 10.7490 mg. La grafica azul describe una reacción endotérmica la cual sucede a 64.14°C y necesito una energía de 1415 J/g para llevarse a cabo, como consecuencia se perdió 0.9701 mg 9.025% de peso. Posiblemente esta perdida de peso esté relacionada con la humedad superficial de la biomasa.

Después de los 110°C inicio una descomposición de lo que se podría nombrar como material volátil finalizando cerca de los 1000°C y en la cual el valor de peso perdido por la muestra es de 7.705 mg equivalente a un 71.68%.

Gráfica 5: TGA Carbón M2 75% y Biomasa (*Chenopodium*) 25%



Fuente: INCITEMA, UPTC.

Para este ensayo se usó una muestra de una mezcla de carbón M2 (Malla 16)-biomasa con una proporción de 75%-25% respectivamente con un peso de 9.2100 mg. La grafica azul describe una reacción endotérmica la cual sucede a 62.80°C y necesito una energía de 675.9 J/g para llevarse a cabo, como consecuencia se perdió 0.7626 mg 8.280% de peso. Posiblemente está perdida de peso esté relacionada con la humedad superficial de la biomasa.

Después de los 65°C inicio una descomposición de material lo que se podría nombrar como material volátil finalizando cerca de los 1000°C y en la cual el valor de peso perdido por la muestra es de 4.162 mg equivalente a un 45.19%.

En las muestras de carbón M2 (Malla 16), biomasa y la mezcla carbón M2 (Malla 16)-biomasa con una proporción de 75%-25% respectivamente, se observaron comportamientos correspondientes a una reacción endotérmica, en la cual se requiere una absorción energía para poderse llevarse a cabo.

La muestra que mayor energía requirió fue la de biomasa de (Chenopodium), 1415 J/g fueron necesarios para que esta se realizara. Entre tanto que la que menor energía requirió fue la de carbón M2 (Malla 16) con 631.7 J/g. Esto significa que para que se dé la reacción el carbón requirió 44.64% menos de energía.

La mezcla requirió una energía de 675.9 J/g para poderse dar. Esto significa que comparado con el carbón M2 (Malla 16), requirió 6.54% más de energía. Y comparado con la biomasa requiere 47.77% menos de energía para poderse realizar.

3.3.10 Gasificación. Los parámetros usados para la gasificación fueron temperatura de 800°C usando como agente gasificante aire, haciendo tres repeticiones por cada ensayo.

Tabla 34: Gasificación de las mezclas

No.	Mezcla Carbón-biomasa		% O ₂	% CO ₂	% CO	Produce gas de síntesis
	%Carbón	%Biomasa				
1 M1	100	0	15	20	12	SI
2 M2	100	0	14	19	14	SI
3	0	100	16	16	17	SI
4 M1	75	25	15	17	13	SI
5 M2	75	25	14	19	15	SI
	%Carbón M1	%Carbón M2				
6	50	50	16	20	11	SI

Fuente: Autor

El gas de síntesis producido es el CO y como se puede observar todas las mezclas lo producen.

La biomasa lo produjo en mayor medida que las demás mezclas. Siendo el carbón M1 el que lo genero en menor cantidad.

El oxígeno presente en las mezclas parece contante no varía de forma brusca y si mantiene en un rango de 14% a 16%.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de la caracterización unitarios de la provincia centro de Boyacá, indican según la norma ASTM D 388, que son carbones de bajo rango usados comúnmente para gasificación a nivel internacional.

Para determinar la mezcla con mejor desempeño en el proceso de gasificación se tuvieron en cuenta los análisis próximos de estas, con lo cual se obtuvo que la muestra que mejor desempeño podría mostrar en el proceso de gasificación es la mezcla de carbón-biomasa realizada con carbón M2 y biomasa de (*chenopodium*), teniendo un 15% de gas de síntesis (CO).

Se demostró que los carbones de la provincia centro de Boyacá tienen propiedades que facilitarían el proceso para la co-gasificación.

La biomasa vegetal de tipo arvense *chenopodium* conocida como cenizo es comúnmente encontrada en cultivos transitorios, por esto hace que su ciclo de vida sea corto y permite una fácil recolección.

El alto contenido de oxígeno en los resultados de gasificación puede deberse a que el reactor no estaba sellado completamente y pudo haber presentado fugas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia nacional de minería. Producción de carbón por departamento. Minería. P.2.
- ASTM D 121. Standard Terminology of Coal and Coke. En: Annual Book of ASTM Standards. United States, 2002. P. 10
- ASTM D 388. Standard Classification of Coals by Rank. En: Annual Book of ASTM Standards. United States, 2012. P. 2
- BARRAGÁN. PLAN DE NEGOCIOS, ECO COMBUSTIBLES S.A.S. ESCO S.A.S. Gestión de Tecnología. (2011). P. 26, 33, 52-58.
- BP Statistical Review of World Energy. 66th edition, June. 2017. P. 36 y 37.
- BRUCE A y Tillman, D. Wood cofiring evaluation at tva power plants.1996
- Capitulo 6. Difracción de rayos X [en línea]. <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10343/Capitulo6.pdf>> [citado 28 septiembre de 2017]
- CASTELLS, Xavier. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos: Biomasa, Barcelona, España. 2005. P.118. ISBN: 84-7978-694-9.
- DEMIRBAŞ, A. Sustainable cofiring of biomass with coal. In Energy Conversion and Management. 2003 (pp. 1465-1479). [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00144-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00144-9).
- EMAMI-TABA, L; IRFAN, M.F.; WAN DAUD, W.M.A; CHAKRABARTI, M.H. Fuel blending effects on the co-gasification of coal and biomass . A review. Biomass and Bioenergy, 2013. 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.043>.
- ENERGIAS RENOVABLES. Biomasa: ventajas y desventajas [en línea]. <<http://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/biomasa-ventajas-desventajas/>>[citado en 22 septiembre de 2017]
- FERNÁNDEZ, Jesús. Energías Renovables para todos “Biomasa”. Energías Renovables. 2011. P.2.
- INCAR. Fusibilidad de cenizas. [en línea]. <<http://www.incar.csic.es/fusibilidad-de-cenizas>> [citado 16 septiembre de 2017]
- INGEOMINAS. Método para la determinación de carbón y coque. Bogotá. 1988.
- KIRUBAKARAN. A review on gasification of biomass. En: R. enewable and Sustainable Energy Reviews. (2009). P. 86-179.

LEÑAS OLIVER. ¿Que son las briquetas? [en línea]. <<http://tiendabiomasa.com/briqueta>> [citado 28 septiembre de 2017]

Lexique International de Petrografia des Charbon. Segunda Edición. Paris, 1963.
PARRA, William Alexander. Biosorción de metales pesados en drenajes mineros empleando biochar. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Tunja: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia. Facultad De Ingeniería. Escuela De Ingeniería Ambiental. 2018. 40p.

PARRA, William Alexander. Biosorción de metales pesados en drenajes mineros empleando biochar. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Tunja: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia. Facultad De Ingeniería. Escuela De Ingeniería Ambiental. 2018. 41-42p.

PINILLA, C. Identificación de la flora asociada a plantaciones de banano en Urabá y Magdalena. XXIII Congreso Anual Manejo Integrado de Arvenses, Santa Marta. 2002. P. 129-151.

Poder Calorífico. Fundamentos Teóricos. [en línea]. <<http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/poder-calorifico/poder-calorifico.shtml#introduccion#ixzz5CmhZm0y4>> [citado 16 septiembre de 2017]

RIZKIANA, G. G. Effect of biomass type on the performance of cogasification of low rank coal with biomass at relatively low temperatures. *Matsubara, Aomori Japan: Elsevier*, 2014. P. 134

RIZKIANA, Jenny. Effect of biomass type on the performance of cogasification of low rank coal with biomass at relatively low temperatures. En: Ingeniería y arquitectura. (2014). P.2. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 42.

STM E-1757-01. Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis. En: Annual Book of ASTM Standards. United States, 2015

TOLEDO. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica, mediante gasificación de biomasa. En: Ingeniería y arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). (2015). P. 25-28. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 26.

Universidad autónoma de Madrid. Unidad de Análisis Térmico [en línea]. <https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668322022/1242666562032/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Analisis_Termico.htm> [citado 19 Marzo de 2018]

UPME, Unidad de Planeación Minero-Energética. La cadena del carbón. Bogotá: Hecho en Colombia. 2012. Retrieved from http://www.simco.gov.co/Portals/0/publicaciones/carbon_v2.pdf.

WENKUI ZHUA Catalytic gasification of char from co-pyrolysis of coal and biomass. Vol. Fuel processing technology (2008). P. 89. Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 43.

YONMO, SUNG. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. Elsevier. Experimental Thermal and Fluid Science. (2013). Citado por: Gil, Eduardo. Efecto de propiedades físicoquímicas de briquetas carbón-biomasa en la eficiencia del proceso de gasificación en lecho fijo. Boyacá, Tunja. P. 41.